

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Metody měření geometrických odchylek při aditivní výrobě

Methods of Measurement of Geometric
Deviations in Additive Manufacturing

Student:

Osobní číslo:

Vedoucí diplomové práce:

Kristýna Bartošková

BAR0571

Ing. Ondřej Mizera

OSTRAVA 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Kristýna Bartošková**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Metody měření geometrických odchylek při aditivní výrobě**
Methods of Measurement of Geometric Deviations in Additive Manufacturing
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Analýza současného stavu řešené problematiky.
3. Metody měření aditivní výroby.
4. Metody měření geometrických odchylek.
5. Měřicí zařízení pro měření součástí vyrobené aditivní výrobou.
6. Experimentální část.
7. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

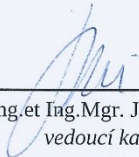
PERNIKAŘ, J.; TYKAL, M.; VAČKAŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno: VUT v Brně. 2004. 151 s. ISBN 80-214-1997-0.
ČEPOVÁ, L.; PETŘKOVSKÁ, L. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže. 2011, 100 s. ISBN 978-80-248-2514-4.
SRIVATSAN, T.S.; SUDARSHAN, T.S. *Additive Manufacturing: Innovations, Advances and Applications*. CRC Press. ISBN: 978-1-4987-1477-8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Mizera**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

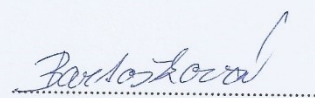



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

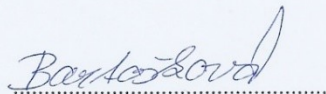
V Ostravě dne 17. května 2020


Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona), bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 17. května 2020



Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BARTOŠKOVÁ, K. *Metody měření geometrických odchylek při aditivní výrobě: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 59 s. Vedoucí práce: Mizera, O.

Bakalářská práce se zabývá metodami měření geometrických odchylek při aditivní výrobě. V teoretické části se nachází přehled norem pro měření a vyhodnocení geometrických tolerancí, přehled metod pro měření aditivní výroby a seznámení s různými metodami dotekového a bezdotekového 3D měření. Pro experimentální část byl vytvořen 3D model zubového čerpadla, který byl vyroben technologií 3D tisku v Centrum 3D tisku Protolab VŠB-TU Ostrava a následně změřeny výrobní odchylky na ozubeném kole a hnací hřídeli v laboratoři VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Výsledkem bakalářské práce bylo porovnání měření na tříosouřadnicovém měřícím stroji WENZEL LH 65 X3M s optickou hlavou SHAPETRACER II a HandySCANu BLACK.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BARTOŠKOVÁ, K. *Methods of Measurement of Geometric Deviations in Additive Manufacturing*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 59 p. Thesis head: Mizera, O.

The bachelor thesis deals with methods of measuring geometric deviations in additive production. The theoretical part contains an overview of standards for measuring and evaluating geometric tolerances, an overview of methods for measuring additive production and an introduction to various methods of tactile and non-contact 3D measurement. A 3D model of a gear pump was created for the experimental part, which was produced using 3D printing technology in the Protolab 3D Printing Center VŠB-TU Ostrava and subsequently measured production deviations on the gear wheel and drive shaft in the laboratory VŠB-TU Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and engineering metrology. The result of the bachelor's thesis was a comparison of measurements on a three-coordinate measuring machine WENZEL LH 65 X3M with an optical head SHAPETRACER II and HandySCAN BLACK.

Obsah

Úvod.....	10
1 Analýza současného stavu řešené problematiky	11
1.1 Normy pro měření a vyhodnocení kruhovitosti a válcovitosti	12
1.1.1 ČSN EN ISO 12 181-1:2003, ČSN EN ISO 12 181 2:2003	12
1.1.2 ČSN ISO 4291 (01 4411)	14
1.1.3 ČSN ISO 4292 (01 4412)	17
1.1.4 ČSN EN ISO 10360-1, ČSN EN ISO 10360-2:2001	19
1.1.5 ČSN EN ISO 3274:1997 (20 2322).....	20
1.2 Značení a rozdělení geometrických tolerancí	20
2 Metody měření aditivní výroby	23
2.1 CCD kamera	23
2.2 Laser.....	23
2.3 Souřadnicové měřicí stroje	24
2.4 CT tomografie.....	25
3 Metody měření geometrických odchylek	28
3.1 Měření odchylek přímosti.....	28
3.2 Měření rovinnosti.....	30
3.3 Měření odchylky kruhovitosti.....	30
3.4 Měření odchylky válcovitosti	31
3.5 Měření odchylky polohy	31
3.6 Měření odchylky házení.....	33
4 Měřicí zařízení pro měření součástí vyrobené aditivní výrobou.....	34
4.1 Typy hlav pro snímání parametrů	34
4.2 Bílé světlo	35
4.3 Modré světlo	35
4.3.1 Porovnání bílého světla a modrého světla	36
4.4 Laserový řádkový (lineární) snímač	36
5 Experiment	37
5.1 Měření součástí trísouřadnicovým měřicím strojem s optickou hlavou	38
5.1.1 Nedostatečné naskenování.....	40
5.1.2 Chyby a nejistoty měření.....	41

5.1.3	Vyhodnocení.....	43
5.2	Měření součástí metodou HandySCAN.....	47
5.2.1	Vyhodnocení.....	50
5.3	Zhodnocení metod měření	51
6	Závěr.....	53
7	Seznam použitých zdrojů	56

Seznam použitých zkratk

Symbol	Význam	Jednotka
α	Úhel mezi pevnými doteky	(°)
β	Úhel mezi směrem měření a osou úhlu mezi pevnými doteky	(°)
γ	Odchylka tolerance	(mm)
ΔZ_c	Nejmenší opsaná kružnice	(μm)
ΔZ_i	Největší vepsaná kružnice	(μm)
ΔZ_q	Střední kružnice nejmenších čtverců	(μm)
ΔZ_z	Nejmenší pásmo - mezikruží	(μm)
$\frac{\partial f}{\partial z_i}$	Parciální derivace funkční závislosti dle zdroje z_i	(-)
\bar{x}	Aritmetický průměr	(-)
2D	Dvojdimenzionální, dvojrozměrný	(-)
3D	Trojdimenzionální, trojrozměrný	(-)
A	Osová pozice	(°)
A0	Pozice natočení hlavy	(°)
a_1, a_2	Vzdálenost os koncových měrek	(mm)
A_1, A_2, A_3 a A_4	Vzdálenost koncových měrek	(mm)
C	Osová pozice	(°)
C0	Pozice natočení hlavy	(°)
CAD	Computer-aided drafting	(-)
CDD	Charge-Coupled Devices	(-)
CT	Computed Tomography (Počítačová tomografie)	(-)
d_v	Dolní mezní odchylka	(μm)
FDM	Fused Deposition Modeling	(-)
GPS	Geometrická specifikace produktu	(-)
h_v	Horní mezní odchylka	(μm)
L_1	Vzdálenost číselníkových úchylkoměrů	(mm)
LSCI	Porovnávací kružnice nejmenších čtverců	(-)

M_1, M_2, M_3 a M_4	Vzdálenost koncových měrek	(mm)
MCCI	Nejmenší opsaná referenční kružnice	(-)
MICI	Největší opsaná referenční kružnice	(-)
MZCI	Referenční kružnice nejmenší oblasti	(-)
n	Počet měření	(-)
NDT	Nondestructive testing	(-)
$\phi d_1, \phi d_2, \phi d_3$ a ϕd_4	Průměry trnů	(mm)
P	Jmenovitý rozměr	(mm)
PH10	Motoricky indexovatelná hlava	(-)
R	Drsnost povrchu	(μm)
r	Poloměr povrchu	(mm)
R_1	Poloměr hrotu doteku	(mm)
R_{\max}	Maximální vzdálenost poloměru kružnice	(mm)
R_{\min}	Minimální vzdálenost poloměru kružnice	(mm)
$s(\bar{x})$	Směrodatná odchylka	(-)
SLS	Selective Laser Sintering	(-)
SMS	Souřadnicový měřicí stroj	(-)
STL	Stereolitografie	(-)
T,t	Toleranční pole	(-)
u	Standartní nejistota	(-)
u_a	Standartní nejistota typu A	(-)
u_b	Standartní nejistota typu B	(-)
u_c	Kombinovaná nejistota	(-)
$u_{B_{z_i}}$	Standartní nejistoty typu B zdroje z_i	(-)
UPR	Vlny na otáčku	(-)
v_j	Odchylka od jmenovitého rozměru	(μm)
W	Vlnitost povrchu	(μm)
x, y, z	Souřadný systém	(-)
x_i	i-té měření	(-)
Z	Značka s křížovou milimetrovou stupnicí	(-)

Úvod

V současné době se objevilo mnoho inovačních technologií pro výrobu strojních součástí. Jednou z technologií je například aditivní technologie, která byla v minulých letech známá pod názvem Rapid Prototyping, protože se zabývala pouze prototypovou výrobou. Tato perspektivní oblast prošla velkým vývojem a rozvíjí se stále v před. Uplatnila se nejen ve strojírenském průmyslu, ale například i ve stavebnictví či lékařském průmyslu. V dnešní době je nejrozšířenější metoda 3D tisku využívající pro levné zhotovení součástí filament. Avšak pomocí aditivní technologie můžeme tisknout už i kovy a kompozitní materiály, nabídka materiálu se neustále rozšiřuje. Tato technologie se využívá především pro výrobu složitých součástí nebo pro produkty, které jsou nerealizovatelné jinou výrobní metodou.

K dosažení úspěchu na trhu je důležitý předpoklad kvalita. Při současné rozsáhlé konkurenci na trhu je kladen velký důraz na kvalitu a přesnost vyrobené součásti, popřípadě celé sestavy. Proto je nezbytně nutné si správně seřadit stroj, abych předešli nežádoucím zmetkům.

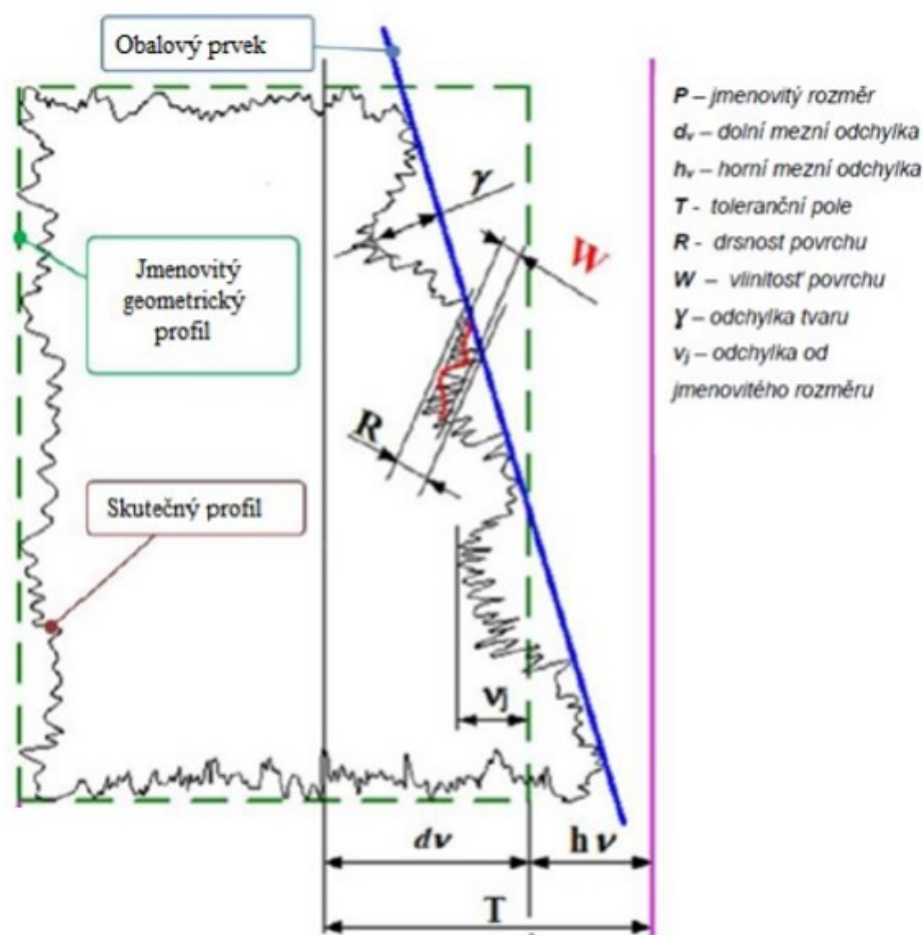
Příčinou geometrických odchylek mohou být teplotní změny, externí vibrace, polohovací a pohybové chyby, přesnost výroby a jiné. Jendou z možností je měřit geometrickou přesnost za pomoci souřadnicového měřicího stroje (SMS), který se nachází téměř ve většině firem. Je preferován u složitějších rotačních výrobků, u kterých je důležité změřit geometrické odchylky. Mimořádně důležitou informací je odchylka kruhovitost, vzhledem k tomu, že rotační součástí jsou velmi rozšířené ve strojírenství.

Bakalářská práce se rozděluje na dvě části. První část formuluje základní termíny a metody pro měření geometrických odchylek. Druhá část bakalářské práce obsahuje měření hnacího ozubeného kola a hnací hřídele zubového čerpadla vyrobené aditivní technologií. Experiment se zabývá měřením třísouřadnicovým měřicím strojem WENZEL LH 65 X3M s optickou hlavou SHAPETRACER II a metodou měření HandySCAN pomocí HandySCANu BLACK.

Čerpadla jsou nedílnou součástí v průmyslu. Čerpadla se dělí do mnoho typů. Pro přepravu viskózních kapalin se uplatňují zubové čerpadlo. Tyto čerpadla se vyznačují především jednoduchostí, co se týče konstrukce a spolehlivosti. Největší využití zubového čerpadla je v odvětví hydrauliky a automobilovém průmyslu.

1 Analýza současného stavu řešené problematiky

U výrobního procesu má značný vliv zvolená technologie, proces výroby, lidské faktory, okolní vlivy a další. Jedná se o geometrické prvky, kterou podmiňují tvary a rozměry. Nemůžeme vyloučit ani to, že nerovnosti, trhliny, vlastnosti daného tvaru a rozmístění nerovností by neměli vliv na geometrii tvaru povrchu součásti. Co nejkompaktnějším změřením povrchu získáme tzv. skutečný obraz povrchu. Při bližším pohledu na změřenou plochu vidíme, že se liší od námi požadovaného rozměru v rámci geometrických odchylek. Odlišnost tvaru je zapříčiněná vlnitostí, která se značí písmenem W a textura povrchu, kterou můžeme najít pod označením R .¹



Obrázek 1 – Odchylky geometrii na vnějšku součásti

Zdroj: KUREKOVÁ, Eva a Peter JURIGA. *Technické meranie - Zväzok II*. Bratislava: Ing. Peter Juriga - Grafické štúdio, 2005, 708 s. ISBN 80-89112-04-8.

1.1 Normy pro měření a vyhodnocení kruhovitosti a válcovitosti

1.1.1 ČSN EN ISO 12 181-1:2003, ČSN EN ISO 12 181 2:2003

Norma ČSN EN ISO 12 181-1:2003 jedná se o první část, tedy o slovník a parametry kruhovitosti pro geometrické požadavky na výrobky (GPS).² Tato norma nám vysvětluje:

a) Všeobecné odborné výrazy:

Tabulka 1 – Souhrn všeobecných odborných výrazů z ČSN EN ISO 12 181 – 1

výraz:	výraz v angličtině:	definice:
kruhovitost	roundness	parametry kružnice
osa kruhovitosti	roundness axis	osa prvku přiřazeného k válcovému nebo rotačnímu povrchu
rovina kruhovitosti	roundness plane	rovina kolmá k ose kruhovitosti v celém rozsahu prvku

b) Pojmy související s profilem:

Skutečná strana (vrchní) součásti (*real surface of a workpiece*)

- Integrální prvek jako segment skutečného povrchu obrobku ohraničený přilehlými skutečnými segmenty [ISO 14660-1:1999, definice 2.4].

Zjištěná obvodová křivka (*extracted circumferential line*)

- Digitální zobrazení průsečnice skutečné vrchní strany součásti a roviny kruhovitosti.

c) Odborné názvy odkazující se k referenci kružnici

Referenční kružnice (*reference circle*)

- daná kružnice orientovaná k profilu kruhovitosti dle speciální dohody, na které jsou závislé odchylky kruhovitosti a vlastnosti kruhovitosti.

Referenční kružnice nejmenší oblasti (*minimum zone reference*)

- používaná zkratka pro tento pojem je MZCI,
- dvě kružnice jejichž střed má stejnou polohu určují kruhový profil a leží v nejmenší kolmé vzdálenosti.

Vnější referenční kružnice nejmenší oblasti (*outer minimum zone reference circle*)

- největší kružnice nejmenší oblasti referenčních kružnic.

Vnitřní referenční kružnice nejmenší oblasti (*inner minimum zone reference circle*)

- menší kružnice nejmenší oblasti referenčních kružnic.

Aritmetická referenční kružnice nejmenší oblasti (*mean minimum zone reference circle*)

- střední kružnice nejmenší oblasti referenčních kružnic.

Porovnávací kružnice nejmenších čtverců (*least squares reference circle*)

- používaná zkratka pro zmíněnou definici je LSCI,
- kružnice jejíž součet čtverců lokálních odchylek kruhovitosti nejmenší.

Nejmenší opsaná referenční kružnice (*minimum circumscribed reference circle*)

- používaná zkratka pro tento pojem je MCCI,
- kružnice s nejmenším možným poloměrem, která je umístěna mimo profil kruhovitosti.

Největší opsaná porovnávací kružnice (*maximum inscribed reference circle*)

- používaná zkratka je MICI,
- kružnice s největším možným poloměrem, umístěna v profil kruhovitosti.

Přidružený odvozený střed (*associated derived centre*)

- centrum (střed) referenčního kruhu.

d) Odborný výraz odkazující se k obvodu

Vlny na otáčku (*undulations per revolution*)

- tento termín se označuje zkratkou UPR,
- počet sinusových vln zahrnutých na profilu kruhovitosti.

Obvodová vlnová délka (*circumferential wavelength*)

- obvod referenční kružnice rozdělený dle vln na otáčku.²

e) Odborný výraz odkazující se k filtraci

Není-li určeno jinak, jsou podrobnosti o charakteristikách filtrů upřesněny v ISO/TS – 12181-2.

Vlnový filtr (*wave filter*)

- transformuje dané rozmezí sinusových vln, pro něž je určený poměr amplitudy vstupu k výstupu.

Přenosová charakteristika filtru (*transmission characteristic of a filter*)

- amplituda sinusového profilu závislá na vlnové délce je tlumena stupněm přenosové charakteristiky.³

Druhá část normy (ČSN EN ISO 12 181-2:2003) pro geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Kruhovitost nám definuje operátory specifikace (*Specification operators*).

Kvalifikovaný operátor upřesňuje oblast přenosu pro profil kruhovitosti povrchu současně se správnou geometrií snímacího hrotu.

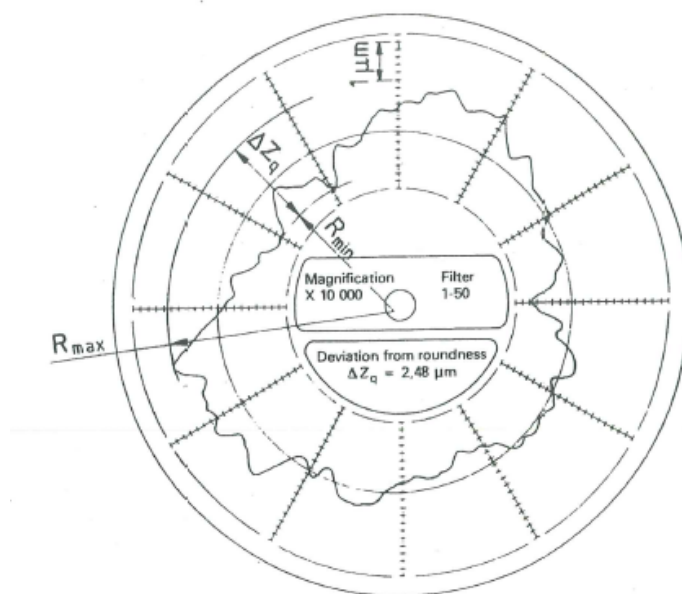
Tato norma definuje dlouhovlnný propustný filtr, který musí být fázově řízený dle ISO 11562, dále určuje krátkovlnný propustný filtry, který přenáší kratší vlny než mezní frekvence cut-off a mezní hodnoty vlny na otáčku. Ve čtvrtém bodě normy najdeme

vysvětlení pojmů, co se týče snímacího systému. Ideální tvar špičky hrotu je koule a síla, která snímá povrch součásti je rovna 0. V příloze A, která je informativní nalezneme obsah harmonických složek a popis chyby vzorkování a Nyquistova kritéria. V příloze B je popsána závislost maticového modelu GPS. Příloha B je taktéž informativní a podrobněji rozebírána v ISO/TS 14638.³

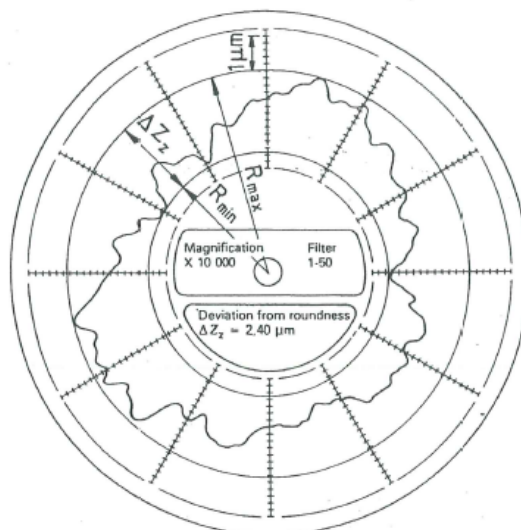
1.1.2 ČSN ISO 4291 (01 4411)

Norma popisuje metody hodnocení úchylek kruhovitosti a měření změn poloměru. Jedná se o mezinárodní normu, která definuje typy zařízení a základní nařízení, doporučení pro užívání přístrojů, metody seřizování zařízení a kontrola jejich parametrů. ČSN ISO 4291 se používá k vyhodnocení úchylek kruhovitého obrobku (součásti) od ideálního tvaru pomocí transformovaného profilu dosaženého za určitých podmínek, vyjádřených k jednomu středu.

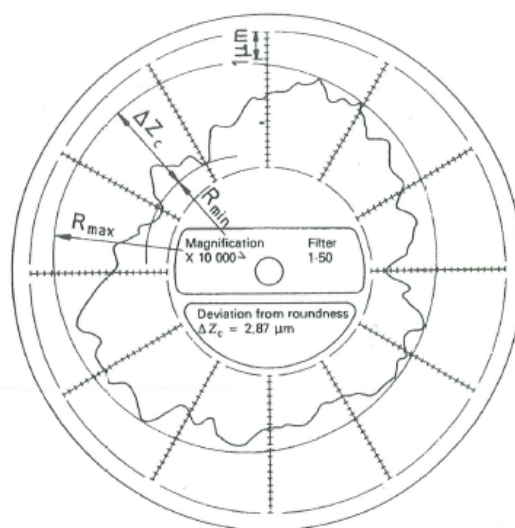
Norma nám umožňuje použití několika variant středů, a to např. centrum kružnice nejmenších čtverců, centrum kružnice mezikruží (nejmenšího pásma), centrum nejmenší opsané kružnice a centrum největší vepsané kružnice. Zmíněné středy (centrum) smí být použity samostatně.⁴



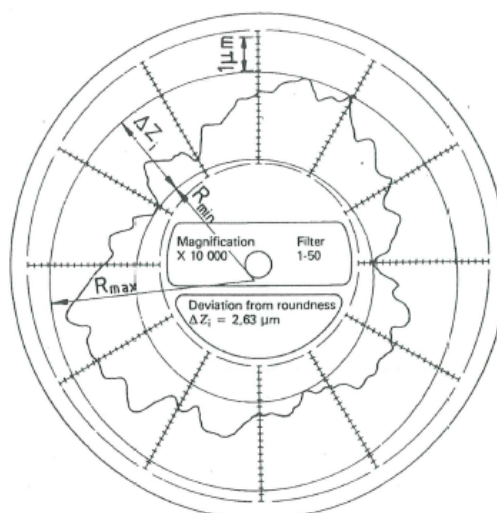
Obrázek 1 – Hodnocení kruhovitosti od centra kružnice nejmenších čtverců⁴



Obrázek 2 – Hodnocení kruhovitosti od centra mezikruží (nejmenšího pásma)⁴



Obrázek 3 – Hodnocení od centra nejmenší opsané kružnice⁴



Obrázek 4 – Hodnocení kruhovitosti od centrum největší vepsané kružnice⁴

Norma obsahuje několik příloh. Příloha A až D pojednává o úchylce kruhovitosti měřeného profilu, o průběhu seřizování a definování systematických chyb otáčení. Příloha E pojednává o konstrukci a čtením polárních diagramů.

Třetí kapitola normy odkazuje na normu ISO 6318, ke můžeme najít definice potřebné pro tuto normu.

Následující kapitola dělí přístroje dle kritérií pro dotykové přístroje využívané pro zjištění odchylek od ideální kružnice a podle povahy parametrů, které získáme na výstupu měření kruhovitosti.

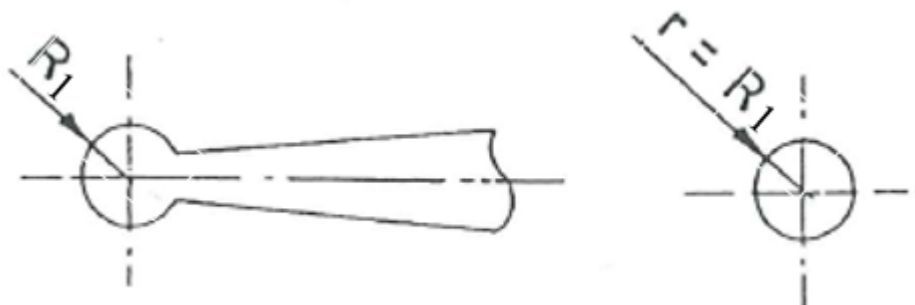
První kritérium dělení do dvou typů:

- a) snímač a hrot dotyku rotuje kolem nehybné součásti,
- b) okolo osy rotuje součást a hrot dotyku se nachází v nehybné poloze.

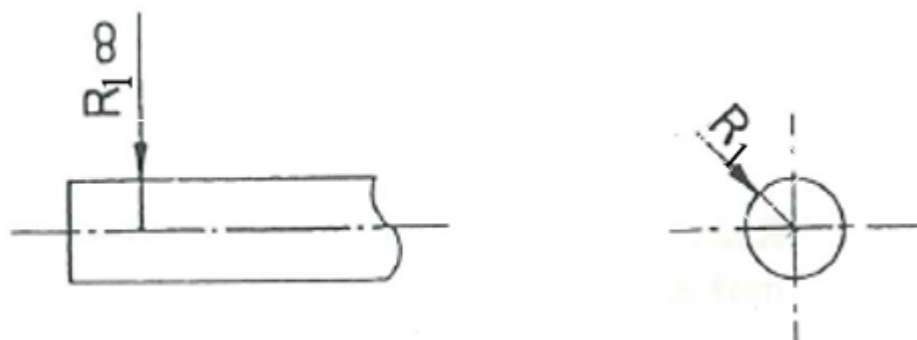
Druhé kritérium dělení dvou typů:

- a) zařízení vytvoří zápis profilu,
- b) zařízení přímo zobrazí hodnoty parametrů.

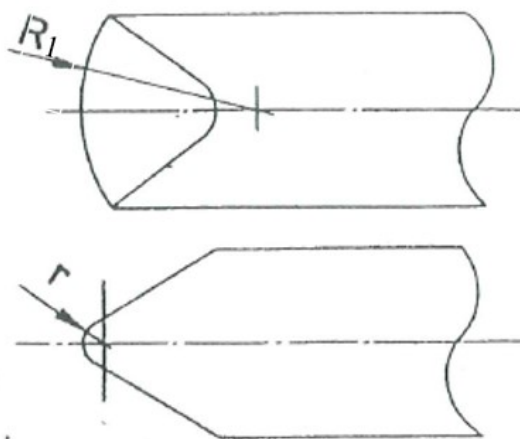
Velkou pozornost bychom měli věnovat při volbě hrotu měřícího dotyku. Hrot se volí v závislosti na charakteristice povrchu kontrolovaném obrobku. Doporučené velikosti poloměrů R_1 jsou zapsány v mezinárodní normě ČSN ISO 4291 (01 4411). Standardní velikosti: 0,25; 0,8; 2,5; 8 a 25 mm. Statická síla pro měření musí být nastavená nižší než 0,25 N. Hodnota zajišťuje stálý dotyk hrotu s měřeným povrchem.⁴



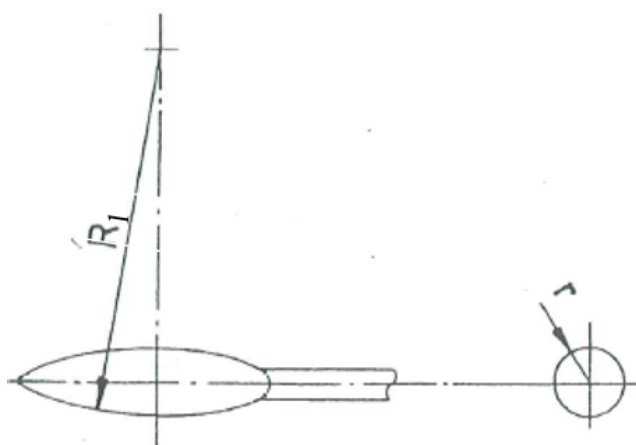
Obrázek 5 – Hrot doteku – kulový⁴



Obrázek 6 – Hrot doteku – válcový⁴



Obrázek 7 – Hrot doteku – klínový (toroidní)⁴



Obrázek 8 – Hrot doteku kapkovitého tvaru⁴

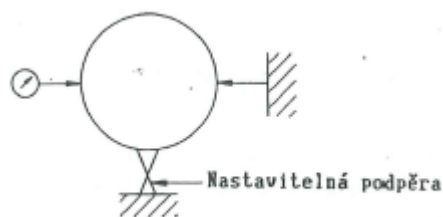
Norma formuluje celkové chyby přístroje, kde rozsah chyby se ustanoví měřením zkušebního vzorku. Celková chyba se uvádí v procentech a zahrnuje např: náhodné a systematické složky chyby vřetena, elektrický šum, vibrace a jiné. Zapříčinit další chybu může otáčení zařízení, u kterých nastává radiální chyba nebo axiální chyba zařízení podle polohy měření. Další nepřesnost v měření může vzniknout při otáčení součástí zapříčiněné vůlí v ložiscích se sdruženými pohyby.⁴

1.1.3 ČSN ISO 4292 (01 4412)

Předmětem mezinárodní normy ČSN ISO 4292 je formulace metody hodnocení odchylky kruhovitosti kombinací měření dvou a tří bodů.⁵

Dvoubodové měření

Jedná se o měření mezi dvěma body ležící na jedné ose, kdy jeden bod je pevný a druhý je pohyblivý v ose měření.⁵



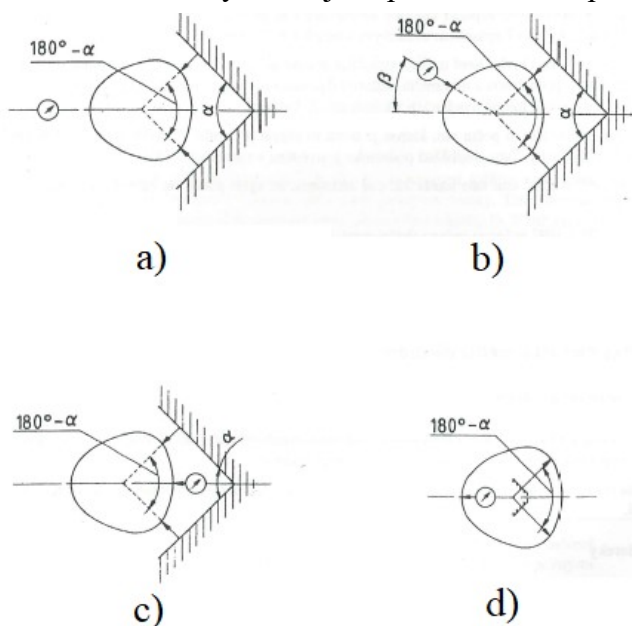
Obrázek 9 – Vnější dvoubodové měření⁵



Obrázek 10 – Vnitřní dvoubodové měření⁵

Tříbodové měření

Měření probíhá mezi dvěma doteky, které jsou pevné a třetí se pohybuje v ose měření.⁵



Obrázek 11 – Tříbodové měření a) uspořádání symetrické, měření shora; b) uspořádání asymetrické, měření shora; c) uspořádání symetrické, měření zdola; d) uspořádání symetrické, měření shora⁵

Jestliže u tříbodového měření se nacházejí pevné doteky na jedné straně a měřící dotek na druhé straně osy obrobku v rovině měření jedná se, tak o měření zdola (*summit method*). Jsou-li dva pevné doteky na totožné straně jako měřící dotek v ose měření jde o měření zdola (*rider method*). Norma upřesňuje symetrické uspořádání u tříbodového měření, jehož směr je totožný s osou úhlu tvořeného stabilními doteky. A asymetrické uspořádání má směr měření dán úhlem sevřenými fixními doteky a osou úhlu.

Norma umožňuje několik volitelných variant úhlů mezi pevnými doteky (viz tabulka 2). Lze rozšířit měřící metody v předem zvolených podmínkách.⁵

Tabulka 2 – Úhel mezi stabilními dotyky⁵

Symetrické uspořádání	Asymetrické uspořádání	
Úhel mezi pevnými dotyky α	Úhel mezi pevnými dotyky α	Úhel mezi směrem měření a osou úhlu mezi pevnými dotyky β
90° a 120° 72° a 108°	120° 60°	60° 30°

Předpoklady pro měření a měřicí přístroje

Stálá měřicí síla dotyku by neměla převýšit hodnotu více než 1 N. Musí být nastavitelná na nejnižší hodnotu, která zajistí fixní kontakt mezi dotekem a měření vrchní strany (povrchu).

Při nedodržení měřicí síly může dojít k ovlivnění výsledku u tenkostěnných obrobků. Je nutné sílu nastavit na nejnižší úroveň.

Dle tvaru obrobku se volí měřicí dotek pomocí tabulky 3. Pevné doteky se musí obstarat bodovým nebo přímkovým dotykem za použití prizma s malým poloměrem u vnějších měření. Operátor zodpovídá za to, že rovina měření je stejná jako středová rovina koule u vnitřního měření.⁵

Tabulka 3 – Měřicí doteky (rozměry v mm)⁵

Tvar povrchu	Poloměr doteku	Poloměr povrchu
Vypuklý povrch (kulový)	2,5	všechny
Vypuklý profil (válcový)	2,5	všechny
Vydatý povrch (kulový)	2,5	≥10
Vydatý profil (válcový)	2,5	≥10
Vydatý povrch (kulový)	0,5	<10
Vydatý profil (válcový)	0,5	<10
POZNÁMKA – V případě vnějšího, dvoubodového měření se použije plochý dotek (poloměr = ∞).		

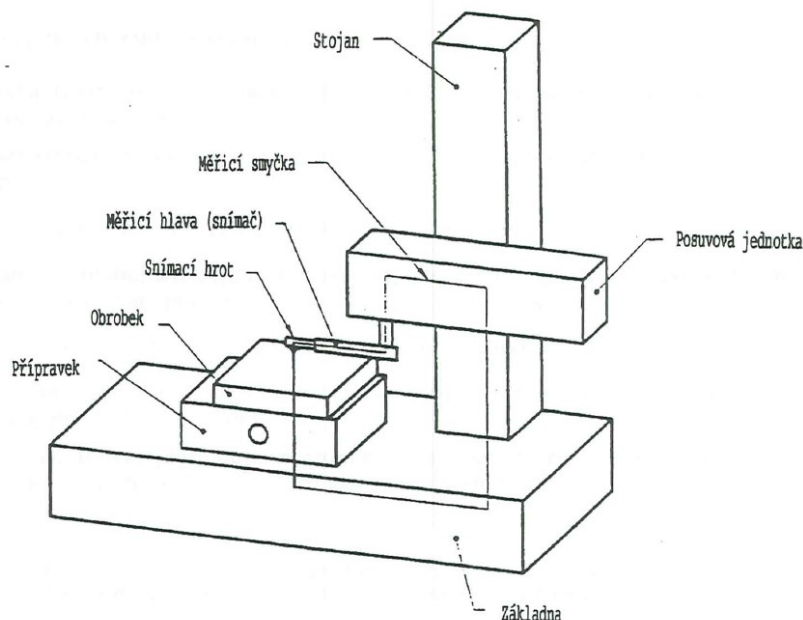
1.1.4 ČSN EN ISO 10360-1, ČSN EN ISO 10360-2:2001

Norma definuje geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (SMS) – Část 1: Slovník.⁶

Norma ČSN EN ISO 10360-2:2001 pro geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (SMS) – Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů již není platná a byla nahrazena normou EN ISO 10360-2:2009.⁷

1.1.5 ČSN EN ISO 3274:1997 (20 2322)

V normě nalezneme ve třetí kapitole definice objasňující snímací profil, referenční profil, úplný profil a jiné. V této evropské normě jsou rozepsány jednotlivé komponenty dotykového přístroje pro měření geometrických odchylek (Obrázek 12).



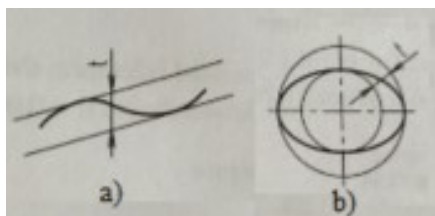
Obrázek 12 – Měřicí smyčka SMS⁸

Měřicí smyčkou se nazývá uzavřený okruh, zahrnující veškeré mechanické části spojující měřený objekt a snímací hrot. Součástí zajišťující pohyb měřicí hlavy po přímce se jmenuje referenční vedení. U SMS umožňuje posuvová jednotka pohyb měřicí hlavy podél referenčního vedení a transformuje horizontální pozici špičky snímacího hrotu na souřadnice profilu, které jsou horizontálně orientované.⁸

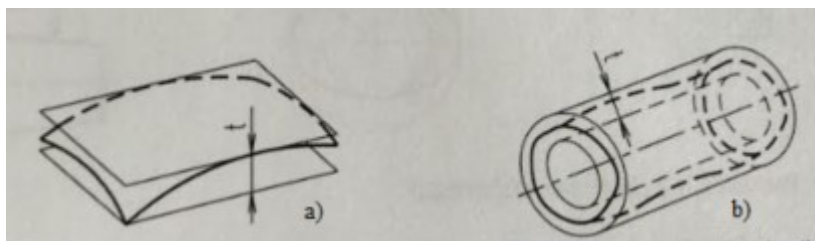
1.2 Značení a rozdělení geometrických tolerancí

Každá funkční součást by měla mít geometrický přesný tvar. Především funkční plochy jsou pro nás důležité, a proto se na ně vztahuje přesnost rozměrů a struktura povrchu. Rozměry mohou mít přípustnou odchylku od skutečných tvarů, která se definuje geometrickými tolerancemi.¹²

Geometrické tolerance se dělí na všeobecné tolerance, toleranční pole a toleranční prostor. Všeobecné tolerance je dána ČSN ISO 2768-2. Toleranční pole je znázorněné na Obrázku 13. Bývá ohraničeno v rovině dvěma ekvidistantními křivky nebo přímkami. Toleranční prostor se vyjadřuje tak, že v něm musí ležet geometrický prvek (rovina, plocha) viz Obrázek 14.^{12 13}














Obrázek 13– Toleranční pole (a) toleranční pole přímosti, b) toleranční pole kruhovitosti)¹²



Obrázek 14 – toleranční prostor (a) toleranční prostor přímosti, b) toleranční prostor válcovitosti)¹²

Tabulka 4 – Přehled rozdělení a značení geometrických tolerancí¹¹

NÁZEV		ZKRATKA ČSN	ZKRATKA ISO	ZNAČKA
TOLERANCE VZTAHUJÍCÍ SE K JEDNOMU PRVKU:				
TOLERANCE TVARU	PŘÍMOSTI	TFL	ST STR	—
	ROVINNOSTI	TFE	FL FLA	
	KRUHOVITOSTI	TFK	CR CIR	
	VÁLCOVITOSTI	TFZ	CY CYL	
	PROFILU PODÉLNÉHO ŘEZU	TFP	V normě ISO neobsazeno	==
TOLERANCE VZTAHUJÍCÍ SE KE DVĚMA NEBO VÍCE PRVKŮM:				
TOLERANCE SMĚRU	SKLONU	TPN	AN ANG	
	KOLMOSTI	TPR	PE PER	
	ROBNOBĚŽNOSTI	TPA	PA PAR PRL	
	RŮZNOBĚŽNOSTI	TPX	V normě ISO neobsazeno	

TOLERANCE POLOHY	SOUOSOSTI	TPC	CA CAX COA	
	SOUSTŘEDNOSTI	-	CO CON	
	UMÍSTĚNÍ	TPP	PO POS	
	SOUMĚRNOSTI	TPS	SY SYM	
TOLERANCE HÁZENÍ	KRUHOVÉ HÁZENÍ OBVODOVÉ	TCR	CR CRO	
	KRUHOVÉ HÁZENÍ ČELNÍ	TCA	AR ARO	
	HÁZENÍ V DANÉM SMĚRU	TCD	V normě ISO neobsaženo	
	CELKOVÉHO HÁZENÍ OBVODOVÉHO	TCTR	TR TRO	
	CELKOVÉHO HÁZENÍ ČELNÍHO	TCTA	V normě ISO neobsaženo	
TOLERANCE VZTAHUJÍCÍ SE K JEDNOMU PRVKU NEBO KE DVĚMA (A VÍCE) PRVKŮ:				
TOLERANCE TVARU	TVARU PLOCHY	TCE	PS PFS	
	TVARU ČÁRY	TCL	PL PFL	

2 Metody měření aditivní výroby

Produkty vyrobené 3D technologií je nutné zkontrolovat, a to z důvodu možností výskytu nedostatku materiálu (chybějícího) při tisku. Chybami jsou například proměnlivý průměr vytisknutého vlákna, kroucení, mezera mezi okrajem a výplní a jiné. Rozměrové chyby 3D tisku mohou být vyhodnoceny prostřednictvím optických zařízení, laseru, 3D SMS a rentgenového paprsku v podobě CT tomografie.

2.1 CCD kamera

Metoda měření CCD kamerou je vhodná pro měření součástí vyrobené aditivní technologií. Tato metoda není nijak vázaná a ovlivněná zkoumaným materiálem. Kamera obsahuje polovodičovou součástku CCD (Charge-Coupled Devices). Polovodičová součástka přeměňuje světlo, které dopadá na křemíkové destičky na velikost náboje. Dopadající světlo ve formě fotonů se uloží v potenciálových jámách v podobě náboje. Potenciální jáma znemožňuje volný pohyb elektronů. Jeden pixel CCD snímače představuje každá potenciální jáma. Díky této kameře umístěné například v bezkontaktním měřicím přístroji můžeme přiblížit zkoumaný povrch až 100x.¹⁵



Obrázek 15 – CCD kamera

Zdroj: <https://www.gxccd.com/art?id=337&lang=405>

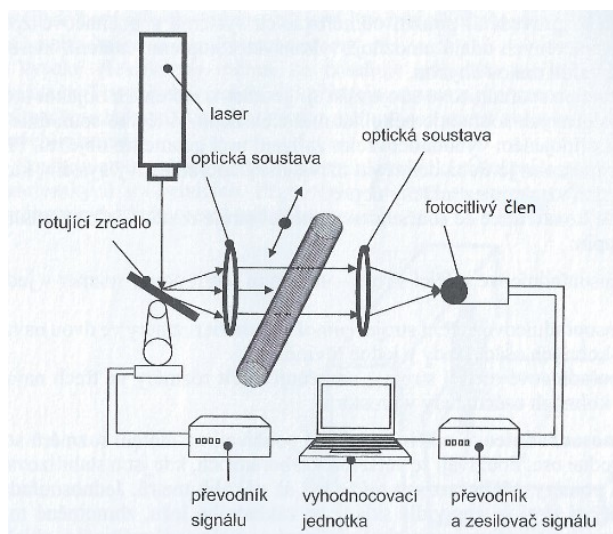
2.2 Laser

Měření laserem má širokou oblast využití, a to měření na krátké vzdálenosti (mm) i delší vzdálenosti v řádu desítek metrů. Laserové měřicí zařízení jsou založeny na principu interference laserových vln (dvě a více). Výhody laserových měřicích zařízení spočívají v přesnosti měření, jednoduchém a rychlém vyhodnocení, měření bez dotyku a výše zmíněné oblasti využití. Přesnost měření závisí na okolních atmosférických podmínkách, které mění velikost indexu lomu vzduchu. I aktuální teplota kontrolovaného výrobku může nepatrně ovlivnit výsledné hodnoty.^{9 16 17}

Mezi laserové zařízení pro kontrolu výrobku sestavené 3D technologií patří například laserové skenery. Ty se mohou používat samostatně nebo v rámci výrobních linek, u kterých dochází k průběžné kontrole.⁹

Laserový skener pracuje na principu, kdy laser vyšle paprsek na rychle otáčející se zrcadlo, od kterého se paprsek odrazí přes první část optické soustavy k měřenému objektu a dále pokračuje k druhé části optické soustavy a od ní směřuje k fotocitlivému členu. Zesílený výstupní signál je přiváděn do vyhodnocovací jednotky, zároveň sním i parametr

natočení zrcadla. Obrys kontrolovaného objektu dostaneme prostřednictvím převedeného signálu z fotocitlivého členu a parametru natočení zrcadla. U laserových skenerů máme rozlišitelnost 20 μm až 0,2 μm .⁹

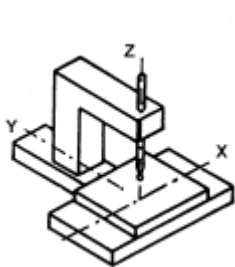


Obrázek 16 – Princip měření laser skenerem⁹

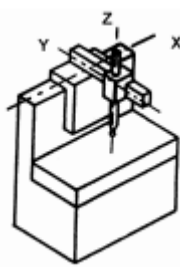
2.3 Souřadnicové měřicí stroje

Rozměry složité tvarové součásti vyrobené aditivní technologií nám umožní zkontrolovat souřadnicový měřicí stroj (SMS). K této metodě měření je potřeba správně zkalibrovány měřicí stroj (SMS) a software k němu určený.

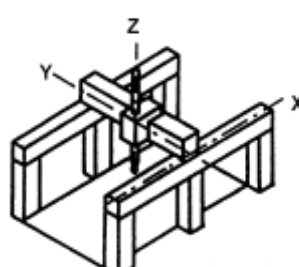
Souřadnicové měřicí stroje jsou hned v několika konstrukčních provedení a to například: stojanový typ (Obrázek 17), výložníkový typ (Obrázek 18), mostový typ (Obrázek 19) a portálový typ (Obrázek 20).^{9 18}



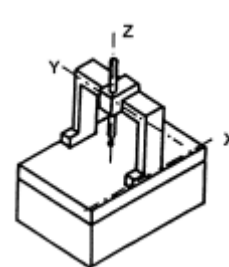
Obrázek 17 – Stojanový typ¹⁰



Obrázek 18 – Výložníkový typ¹⁰

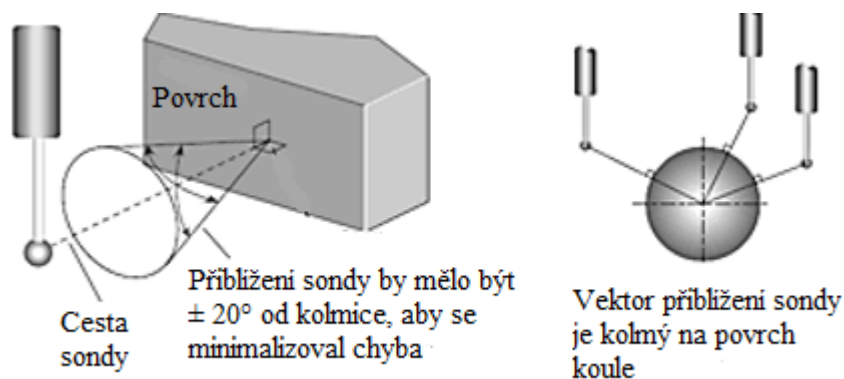


Obrázek 19 – Mostový typ¹⁰



Obrázek 20 – Portálový typ¹⁰

Způsob měření součásti se dělí na dotekové a bezdotekové měření. U dotekové metody měření je nutné dodržovat kolmost dotýkání sondou zakončenou kuličkou. Při aplikaci snímání bodů nesmí docházet k vychýlení doteků při sejmutí bodu. V ideálních podmínkách by měl být sklon kuličky doteku $\pm 20^\circ$ od kolmice, abychom zamezili nepřesným výsledkům (Obrázek 21).^{9 18}



Obrázek 21 – Kontaktní metoda měření třísořadnicovým strojem¹⁸

Bezdotyková metoda měření se realizuje prostřednictvím laserové hlavy (Obrázek 22). Podstatou tohoto měření jsou dva v dané vzdálenosti protínající se laserové paprsky. Jestliže vyhodnocovací jednotka třísořadnicového měřicího stroje zaznamená dotyk znamená to, že měřená součást se dotkla průniku dvou laserových paprsků.⁹



Obrázek 22 – Bezdoteková snímací hlava (laserová hlava)

Zdroj: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1111>

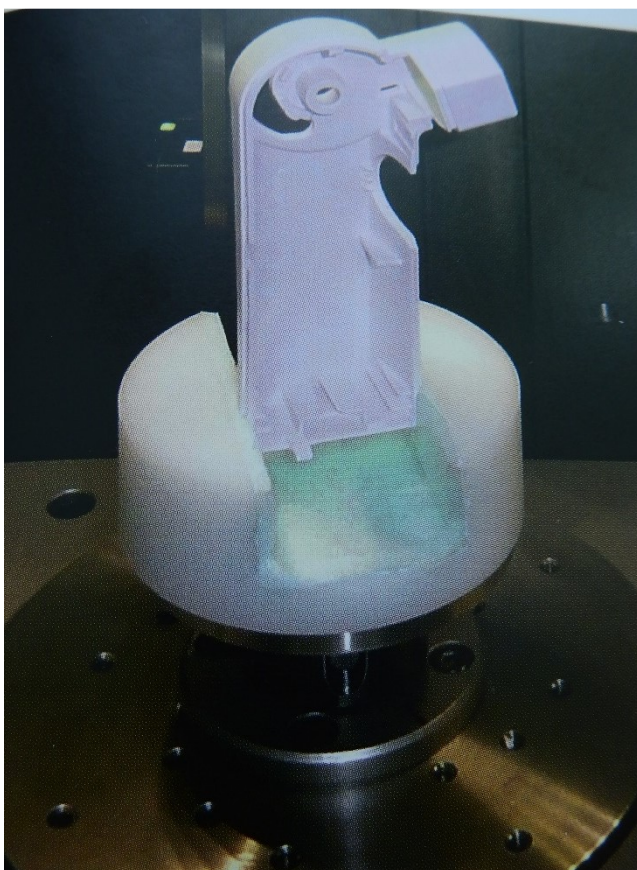
2.4 CT tomografie

Při kontrole součásti nedochází k poškození jeho struktury, proto se tato metoda měření zahrnuje do nedestruktivních zkoušek (NDT).

Princip CT tomografie spočívá v rozdílné absorpci rentgenového záření, kterou mají různé části materiálu. Velikost pohlceného rentgenového záření se projeví u dané látky se zvyšujícím se protonovým číslem a čím bude větší dráha rentgenového záření tím méně rentgenového záření vystoupí z kontrolované součásti.^{20 33}

Před měřením CT tomografií je důležité zvolit patřičné zvětšení (měřítko zobrazení). Upnutí kontrolované součásti by mělo mít co nejmenší vliv na výsledek měření. U součástí z materiálů, které mají velkou hustotu (ocel a hliník) je vhodné upínat do přípravků z plastu.

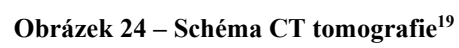
Plast je transparentnější na prozáření než kontrolovaný kov, a tedy není na snímku téměř vidět. Při kontrolování plastových součástí (s malým obsahem přísad) je nutné prostřednictvím tenkých desek z pěnového materiálu vytvořit distanci mezi upínacím přípravkem a kolem kontrolované součásti (Obrázek 23). Rotující kontrolované součásti se nasnímají rentgenovým zářením ze všech možných směrů a rentgenová trubice je většinou stacionární viz Obrázek 23. Součást je prozářena rentgenovými paprsky ve tvaru kužele, popřípadě jehlanu na plochý detektor. Pro co nejmenší odchylky měření je nutná co nejmenší úhel kužele. CT tomografie nasnímá až tisíc dvourozměrných obrazů pomocí 2D optických senzoru (pixely) v různých polohách až vznikne 3D model kontrolované součásti prostřednictvím voxelů (objemový obrazový bod).^{19 20 33}



Obrázek 23 – Upínací přípravek pro plastové součásti³³

Tato metoda nám umožňuje nahlédnout do vnitřní struktury měřeného výrobku, dále hodnotit integritu povrchu nebo rozměry a geometrické tolerance. Vzdálenost ohniska zaostření ovlivňuje rozlišení. Světlé voxely poukazují na vysokou absorpci rentgenového záření, kterou má například kov a tmavé voxely představují například vzduch, který se vyznačuje malou absorpcí rentgenového záření.³³

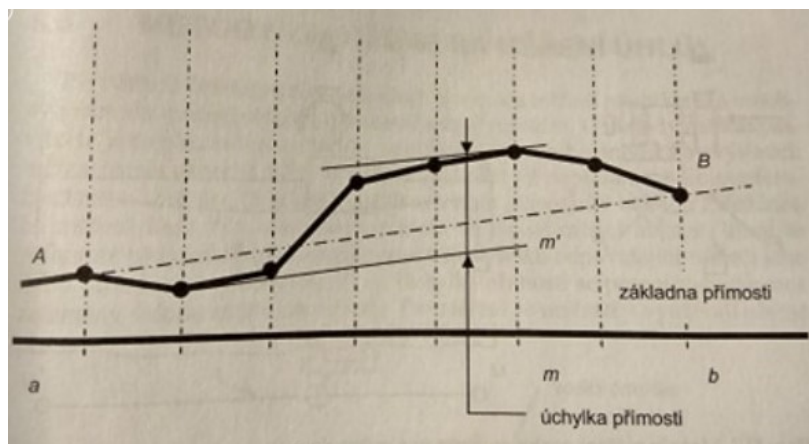
Přístroj pro měření se nazývá tomograf. V dnešní době se můžeme setkat od stolních mikrotomografů až po velké CT stanice s velkým výkonem. Pro efektivní měření například vstřikovacích forem je bezpodmínečně nutné porovnání výsledků měření s CAD daty. Výhodu CT tomografie udává vysoká nedestruktivní přesnost měření i na těžko přístupných místech jako jsou například vnitřní geometrie.^{19 33}



3 Metody měření geometrických odchylek

3.1 Měření odchylek přímosti

Křivka, která se nachází v rovině je považována za přímou v určité délce, jestliže všechny body křivky leží mezi dvěma přímkami, které jsou rovnoběžné se směrem hlavní křivky. Vzdálenost čar je rovna toleranci (Obrázek 25).⁹

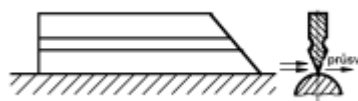


Obrázek 25 – Přímost křivky v rovině⁹

1) Metoda: Vlasové pravítko

Měření vlasovým pravítkem (Obrázek 26) se využívá pro podmínky v dílenských prostorách. Jedná se o kvalitativní metodu, takže odchylku přímosti stanovujeme průsvitem. Kontrolní pravítka lze rozdělit do 4 skupin: ¹⁰

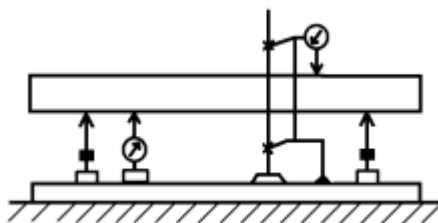
1. Nožové,
2. Trojhranné,
3. Čtyřhranné,
4. Dílenské.



Obrázek 26 – Kontrola odchylek přímosti pomocí vlasového pravítka¹⁰

2) Metoda: prostřednictvím příměrné desky a úchylnoměru

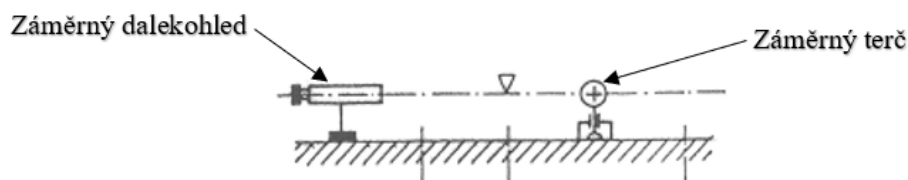
Na měrné ploše je podložena příměrná deska neboli pravítko rozměrově shodnými podložkami viz Obrázek 27. Posouváním číselníkovým úchylnoměrem podél měřené plochy zjišťujeme odchylky přímosti. Odchylku zjišťujeme jako největší rozdíl vzdálenosti měrné plochy od výšky podložek a základny. Tato metoda se využívá pro krátké délky a je kvantitativní.¹⁰



Obrázek 27 – Měření prostřednictvím úchylkoměrem od průměrné desky¹⁰

3) Metoda: optická metoda – záměrný dalekohled a záměrný kříž

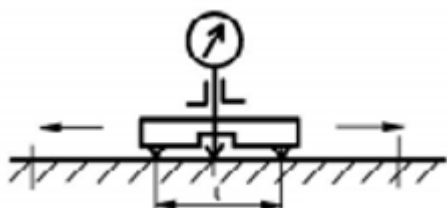
Do tuhého stojanu nastavíme laser (záměrný dalekohled) tak, aby optická osa dalekohledu byla rovnoběžná s měrným povrchem viz Obrázek 28. Po měřené ploše se posunuje záměrný terč a následně se odečtou v dalekohledu výškové rozdíly od optické osy.¹⁰



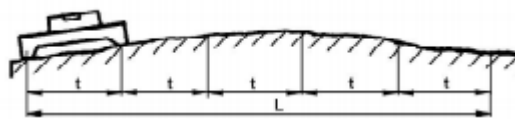
Obrázek 28 – Kontrola odchylky přímosti zaměřovacím dalekohledem a záměrným terčem¹¹

4) Metoda: sečná (kroková)

Zjišťuje relativní změnu sklonu jednotlivých úseků profilu. Pro měření se může použít: a) úchylkoměr (Obrázek 29),
b) libelu (Obrázek 30) apod.¹⁰



Obrázek 29 – Měření přímosti dvoubodovým měřením můstkem s měřícím dotykem středovým za pomoci číselníkového úchylkoměru¹⁰



Obrázek 30 – Měření přímosti dvoubodovým měřícím můstkem a libelou¹⁰

5) Metoda: třísouřadnicový měřicí stroj

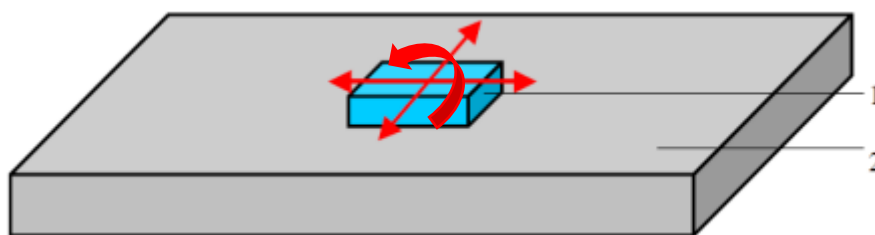
Tato metoda obsahuje složitý měřicí systém, který umožňuje měření v prostoru nebo v rovině. Třísouřadnicový měřicí stroj umožňuje plně automatizované měření i vyhodnocování. Odchylku přímosti určuje dle předem nainstalovaného softwaru a následného sejmutí několika bodů na součásti.^{10 11}

3.2 Měření rovinnosti

Jestliže všechny body roviny (plochy) leží mezi dvěma rovinami, které jsou vzájemně vzdálené o určitou hodnotu a jsou rovnoběžnými s hlavním směrem roviny (plochy) dá se považovat plocha za rovinnou.⁹

1) Metoda: měření průměrnou deskou na barvu

Metoda je zaměřená spíše na dílenské podmínky. Touto kontrolou jsme schopni rozlišit odchylky rovinnosti $> 0,01$ mm a $0,02$ mm. K provedení této kontroly potřebujeme průměrnou desku, na niž bude nanesená speciální barva o velmi tenké vrstvě. Následnými krouživými a posuvnými pohyby se barva dostane na celou plochu kontrolované součásti, která se měří na rovinnost. Dle rozsahu zabarvených ploch (počet otisků barvy na ploše 100×100 mm) se určuje třída přesnosti. U této metody můžeme disponovat s 5- ti třídami přesnosti.^{10 22}



Obrázek 31 – Schéma měření průměrnou deskou na barvu,
1 – natřená průměrná deska speciální barvou,
2 – kontrolovaná plocha na rovinnost.²²

2) Metoda: pomocí interference světla

Planparalelní destička se musí položit na dokonale očištěnou plochu. Mezi planparalelní destičkou a měřenou plochou vznikne vzdušný klín, tudíž světlo, které dopadá interferuje a na ploše vzniknou interferenční proužky, podle nichž se posuzuje rovinnost.¹⁰

3) Metoda: na základě odchylek přímosti (nepřímá metoda)

4) Metoda: souřadnicový měřicí stroj

Pro tuto metodu je nutné zvolit vhodnou síť bodů. Body můžeme nasnímat ručně nebo pomocí automatického režimu. Vyhodnocení odchylky rovinnosti nám vypočítá vhodný software.¹⁰

3.3 Měření odchylky kruhovitosti

Parametry odchylky kruhovitosti můžeme zjistit těmito metodami:

1) Metoda: měření změn poloměru pomocí dotykových zařízení

- kolem stojící součásti se pohybuje (otáčí) měřící dotek,
- statickým dotekem a rotující součástí.

2) Metoda: dvoubodové měření mezi dvěma dotyky ležící na jedné ose (jeden pevný doteky a druhý se může pohybovat ve směru měření)

3) Metoda: třibodové měření mezi dotyky (dva dotyky jsou pevné a třetí se může pohybovat ve směru měření)¹⁴

3.4 Měření odchylky válcovitosti

Pro kontrolu válcovitosti lze použít více přístrojů, a to například souřadnicový měřicí stroj, přístroj pro měření úchylek tvaru, úchylkoměr nebo za pomoci dvou hrotů a elektrického snímače apod. Měřit můžeme spojitě nebo přerušovaně (měření krokovým způsobem).¹⁴

3.5 Měření odchylky polohy

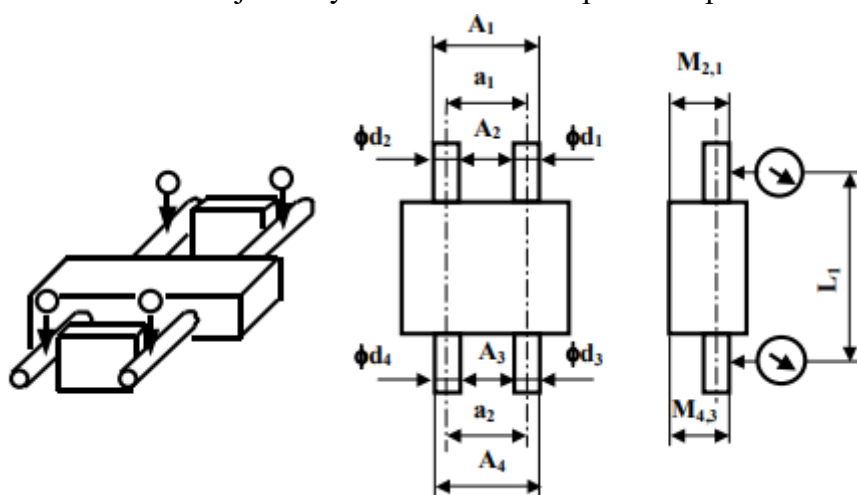
- a) Měření odchylky rovnoběžnosti (dvou přímek v rovině nebo prostoru, přímky a roviny, dvou rovin)

- 1) Metoda: délkové měřidlo

Metoda se používá pro zjištění odchylky rovnoběžnosti dvou rovin. Kontrolovaná součást se umístí na základní plochy (porovnávací rovinu – průměrová deska). Do stojánku se upevní číselníkový úchylkoměr. Stojánkem se pohybuje po základové desce, aby se naměřilo dostatečný počet bodů pro vyhodnocení odchylky.¹⁰

- 2) Metoda: pomocí úchylkoměru a koncových měrek

Touto metodou se definuje odchylka rovnoběžnosti přímek v prostoru.¹⁰

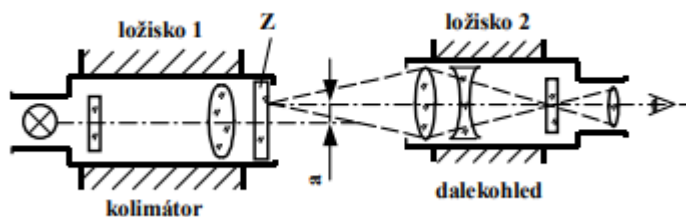


Obrázek 32 – Schéma metody měření prostřednictvím úchylkoměru a koncových měrek
kde: L_1 – zvolená vzdálenost číselníkových úchylkoměrů; A_1, A_2, A_3 a A_4 – vzdálenost koncových měrek; a_1, a_2 – vzdálenost os koncových měrek; M_1 až M_4 – vzdálenost koncových měrek; ϕd_1 až ϕd_4 – průměry trnů.¹⁰

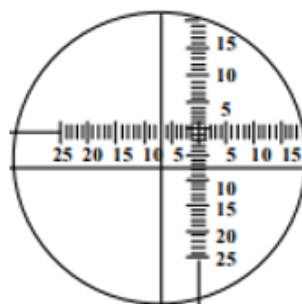
- b) Měření odchylky souososti

- 1) Metoda: kolimátor s dalekohledem

Pro tuto metodu je potřeba umístit značku Z s křížovou milimetrovou stupnicí před kolimátor viz Obrázek 32. Na danou značku zaostříme dalekohled a následně odchylku souososti je možné odečíst v zorném poli viz Obrázek 33.¹⁰



Obrázek 33 – Postup měření kolimátorem s dalekohledem pro kontrolu sousosti¹⁰

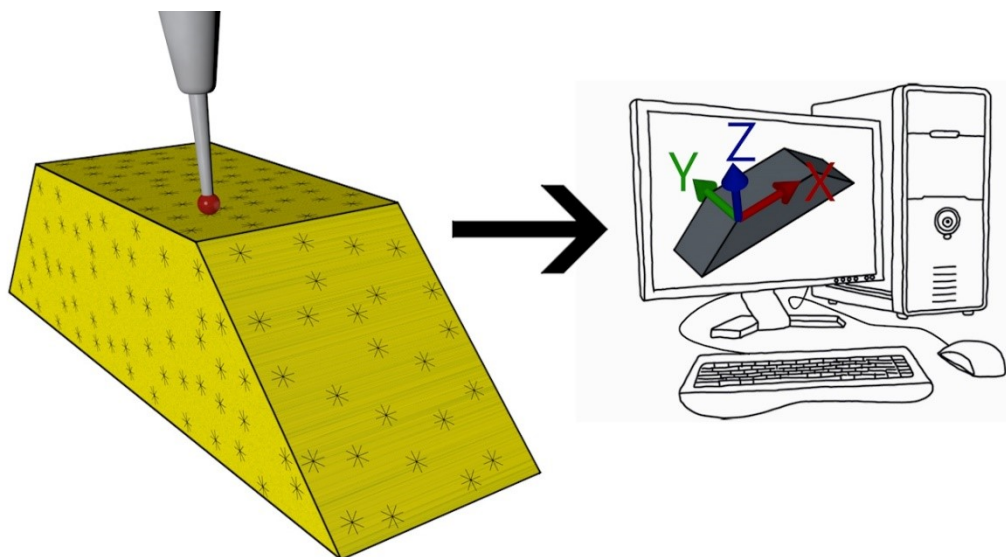


Obrázek 34 – Zorné pole u metody měření kolimátorem a dalekohledem¹⁰

c) Měření odchylky souměrnosti

1) Metoda: třísouřadnicový měřicí stroj

Princip metody třísouřadnicového měřicího stroje spočívá v nasnímání bodů (bod po bodu), které jsou určeny konstrukčními nároky a měřicím přístrojem. Nasnímané body (jejich souřadnice) charakterizující povrch skutečného obrobku vyhodnotí systém v závislosti na ideálním tvaru. Jedná se o velmi přesnou metodu měření.²¹

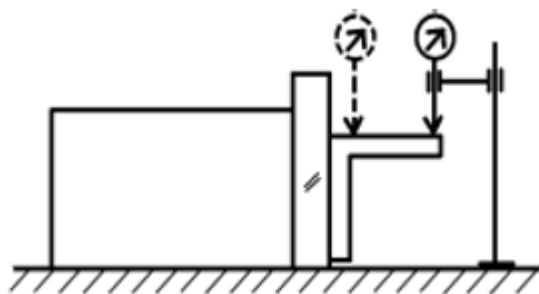


Obrázek 35 – Schéma nasnímání bodů a následný převod dat

2) Metoda: měření za pomoci hrotového přístroje

d) Měření odchylky kolmosti dvou rovin

Můžeme měřit pomocí úhelníků, kontrolních válců, souřadnicového stroje apod.¹⁰

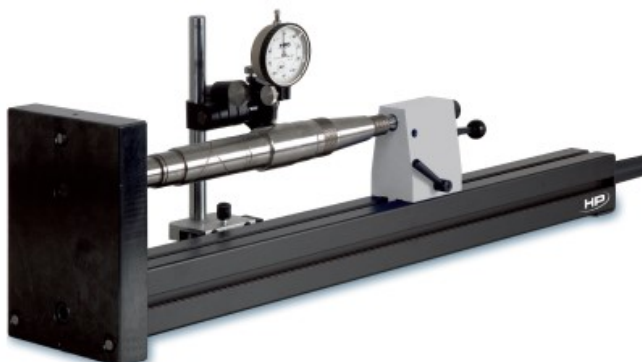


Obrázek 36 – Schéma metody měření odchylky kolmosti svou rovin pomocí úhelníku a číselníkových úchylkoměru¹⁰

3.6 Měření odchylky házení

- 1) Metoda: hrotový přístroj s délkovým měřidlem

Součást se upíná mezi hroty přístroje. Házení se změří na více místech kontrolované součásti číselníkovým úchylkoměrem. Musíme dbát na to, aby úchylkoměr upevněný ve stojanu se pohyboval rovnoběžně s osou součásti. Odchylka radiálního házení je největší zjištěná hodnota.¹⁰



Obrázek 37 – hrotový přístroj s úchylkoměrem

Zdroj: <http://www.microtes.cz/hrotove-pristroje.html>

- 2) Metoda: souřadnicový stroj

Jedná se o obdobu metody měření u souřadnicového stroje při měření kruhovitosti a sousostí.¹⁰

- 3) Metoda: mikroskop

Kontrolovaná součást se musí být upnuta mezi hroty, takovým způsobem, aby měřený průměr byl v zorném poli mikroskopu. U otáčení kontrolované součásti se zaměřujeme na změnu kontury povrchové přímky daného průměru v kolmém směru na osu kontrolované součásti.¹⁰

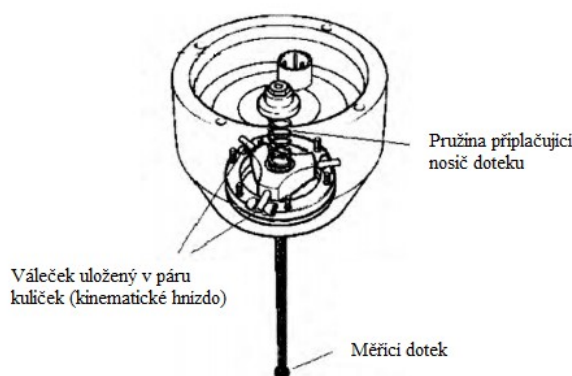
4 Měřicí zařízení pro měření součásti vyrobené aditivní výrobou

4.1 Typy hlav pro snímání parametrů

Snímací hlava je nezbytnou součástí souřadnicového měřicího stroje, protože umožňuje polohování sondy vůči měřenému objektu. Hlava může být pevná, motorizovaná nebo otočná s manuálním polohováním. U dnešních SMS najdeme elektrokontaktní snímací systémy, které se dělí do dvou typů:

1. Spínací typ

Elektrický obvod se skládá z kontaktů, a to umožňuje generovat spouštěcí signál i když je stylus vychýlen v libovolném směru a ve stejné chvíli se ozve zvukový signál, který upozorní na dotek sondy s měřeným objektem. V momentě doteku spouštěcí signál informuje počítač, aby zapsal polohu stroje. Systém spínacího typu je založen na dynamickém režimu, díky němu dostáváme diskrétní parametry. Touto metodou není možný scanning (kontinuitní snímání souřadnic). Spínací hlavy se dělí na pevné, které vynikají vysokou přesností a nízkou nejistotou při měření a indexovatelné (motorické, ruční), ty jsou vhodné pro měření tvarově složité součásti, jednou sondou provedeme celé měření.^{10 23 24}



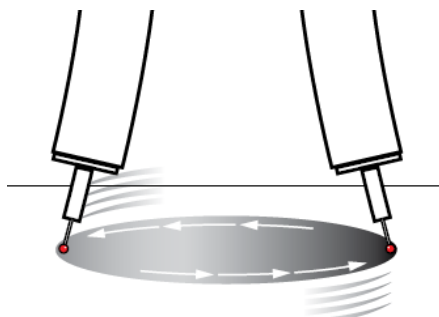
Obrázek 38 – Spínací typ sondy²³

2. Měřicí typ

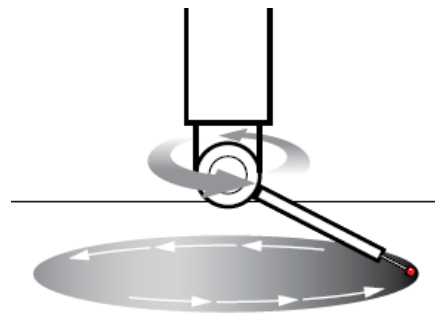
Snímací hlava uskutečňuje měření ve statickém i dynamickém režimu. Statický režim představuje stav, kdy indukční systém se nachází v nulové poloze, ve které můžeme snímat správné hodnoty. Dynamický režim umožní kontinuitní snímání složitějších tvarů objektu – scanning.¹⁰

Kontaktní tříosé skenování, našlo uplatnění především tam, kde je potřeba velké množství dat, ale nedisponuje s maximálním výkonem. Například se využívá v automobilovém průmyslu, kde je zapotřebí přesné měření vrtaných válců. Princip tohoto měření je, že dochází k neustálému zaznamenávání dat při doteku sondy s povrchem měřené součásti (scanning). Optimální je 2000 – 6000 bodů za sekundu.²⁵

Pětiosá technologie měření je založena na indexovaných hlavách anebo pevných sondách. Technologie poskytuje vyšší výkon měření, souhrnné vyhodnocení kvality výrobků a tím zmenšuje prostoje měření. Pětiosé měření souřadnicového měřicího stroje umožňuje nepřerušovaný pohyb doteku po dané dráze tvarově složitých součástí, díky indexované hlavě (Obrázek 40). Řídící systém pomocí algoritmu synchronizuje pohyb souřadnicového měřicího stroje, hlavy a vygenerují optimální trajektorii doteku a minimalizují dynamické chyby SMS.²⁶



Obrázek 39 – Třiosé měření²⁶



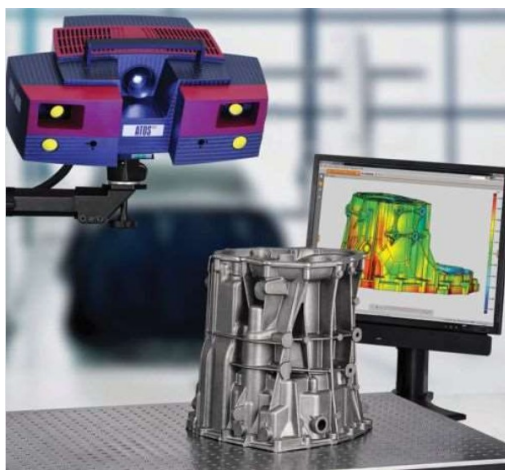
Obrázek 40 – Pětiosé měření²⁶

4.2 Bílé světlo

Jedná se o typ bezkontaktního měření, kde se využívá bílé světlo pro velmi přesné měření. Umožňuje 3D skenování objektů a vytvářet 3D modely. Princip technologie spočívá v promítání stínů čar z 2D čočky na 3D vnější strukturu objektu. Čočka lomí bílé světlo odlišně v souvislosti na jeho vlnové délce, aby mohla změřit vzdálenost. Prostřednictvím systémových algoritmů, které jsou závislé na intenzitě odraženého světla od povrchu kontrolovaného objektu je generován bodový mrak. Během tohoto procesu se souřadnicové body x , y a z spojí a vytvoří nám přesný 3D model měřeného objektu. U 3D skenování bílým světlem se používá kamera, stativ nebo robot, který umožňuje měření na principu point-and-shoot (automatické ostření obrazu), který minimalizuje nároky na nastavení a programování.^{27 28}

4.3 Modré světlo

Další moderní bezkontaktní technologie, která nahrazuje SMS a využívá se i v průběhu výroby za cílem zkrátit dobu měření a rychle a efektivně řešit problematiku oblastí na vyrobených objektech. Fungují na principu point-and-shoot (automatické ostření obrazu). Přes povrch dané součásti skener promítá okrajový vzor modrého světla a jakmile se vzor posune vypočítají se polohy x , y a z souřadnic celého povrchu měřeného objektu. Velmi kvalitní 3D skenery s technologií modrého světla mohou pohotově zajistit miliony přesných 3D datových bodů (bodový mrak). V systému je bodový mrak porovnáván s CAD modelem. Následně se vytvoří 3D inspekční (kontrolní neboli termografickou mapu) barevnou mapu, která nám poskytne barevné spektrum označující oblasti tolerancí nebo mimo toleranci.^{29 30}



Obrázek 41 – Metoda měření prostřednictvím modrého světla³¹

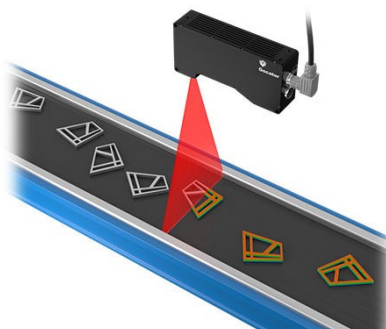
4.3.1 Porovnání bílého světla a modrého světla

Technologie modrého světla nabízí lepší přesnosti a kvalitnější výstupy měření, protože modré světlo má užší vlnovou délku než bílé světlo. Technologie modrého světla poskytuje lepší filtrování rušení od okolního osvětlení v závislosti na úzké vlnové délce.³¹

Na lesklé povrchy součásti je nutné nanést křídový prášek tím dojde k zmatnění povrchu a součást se změří modrým světlem. Křídový prášek se nezbytně musí nanést i na matné černé součásti. Při nanášení křídového prášku musíme brát ohled na případné zkreslení parametrů jako například rádiusy, průměry. Proto musíme zvolit vhodnou tloušťku vrstvy křídového prášku na povrchu měřené součásti. Tento postu se využívá například u plastových výlisků.

4.4 Laserový řádkový (lineární) snímač

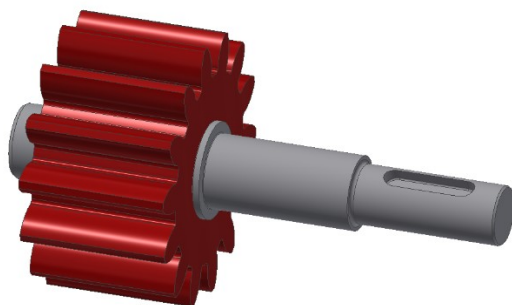
Laserový řádkový snímač měří součásti bezdotekově a s vysokou rychlostí. Při měření se měřená součást pohybuje (například na páse) a snímač je statický. Senzor promítá nepřerušovanou linii laserového paprsku na povrch součásti a následně je tato linie snímána kamerou. Z nasnímaných dat systém měřicího stroje vytvoří mrak bodů ve vysoké kvalitě, které představují příčné průřezy daného objektu. 3D bodové mraky celých součástí se využívají k rozměrovým a objemovým měření a následnému vyhodnocení.³²



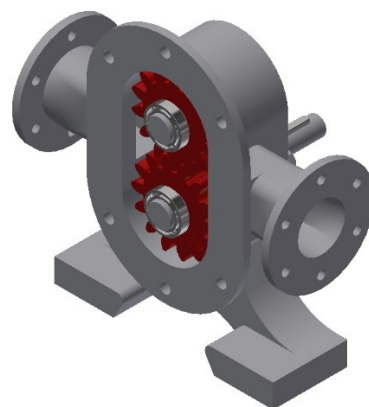
Obrázek 42 – Laserový snímač³²

5 Experiment

Pro experimentální část byl vytvořen 3D model v programu Autodesk Inventor Professional 2019. Následně model musel být exportován do STL souboru, aby se mohl vyrobit prostřednictvím aditivní technologie. Celý model byl vytištěn nejprve jako prototyp metodou FDM, aby se popřípadě zjistili konstrukční chyby a následně byl model vytištěn metodou SLS. Parametry tiskárny viz Obrázek 45. K tisku se použil materiál EOS PA2200 – (PA12).



Obrázek 43 – Model hnací hřídele s nalisovaným ozubeným hnacím kolem



Obrázek 44 – Model zubového čerpadla bez víka a šroubů



PA 2200 Balance 1.0			
PA12		EOS GmbH - Electro Optical Systems	
Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Izod notched impact strength (+23°C)	4.4	kJ/m ²	ISO 180/1A
Shore D hardness	75	-	ISO 7619-1
3D Data	Value	Unit	Test Standard
The properties of parts manufactured using additive manufacturing technology (e.g. laser sintering, stereolithography, Fused Deposition Modelling, 3D printing) are, due to their layer-by-layer production, to some extent direction dependent. This has to be considered when designing the part and defining the build orientation.			
Tensile Modulus			ISO 527
X Direction	1650	MPa	
Y Direction	1650	MPa	
Z Direction	1650	MPa	
Tensile Strength			ISO 527
X Direction	48	MPa	
Y Direction	48	MPa	
Z Direction	42	MPa	
Strain at break			ISO 527
X Direction	18	%	
Y Direction	18	%	
Z Direction	4	%	
Charpy impact strength (+23°C, X Direction)	53	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength (+23°C, X Direction)	4.8	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Flexural Modulus (23°C, X Direction)	1500	MPa	ISO 178
Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (20°C/min)	176	°C	ISO 11357-1/-3
Vicat softening temperature (50°C/h 50N)	163	°C	ISO 306
Burning behavior			UL 94
Test passed, HB	0.5	mm	
Test passed, HB	1.6	mm	
Test passed, HB	3.2	mm	
Other properties	Value	Unit	Test Standard
Density (laser sintered)	930	kg/m ³	EOS Method
Powder colour (ac. to safety data sheet)	White	-	-
Characteristics			
Processing	Chemical Resistance		
Laser Sintering, Rapid Prototyping	General Chemical Resistance		
Delivery form	Certifications		
Powder	FDA approval acc. to USP Biological test (classification VI/121°C)		

Obrázek 45 – Technické parametry tiskárny

Hlavní část experimentu tvoří měření ozubeného kola a hnací hřídele ze zubového čerpadla. Tyto součásti se měřily dvěma metodami pro zjištění geometrických odchylek a následné vyhodnocení, která z metod je přesnější. Je důležité, aby se dodržovala teplota u měření $19,5\text{ }^{\circ}\text{C} \div 20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mohlo by dojít ke zkreslení naměřených hodnot vlivem tepla.

5.1 Měření součástí třísouřadnicovým měřícím strojem s optickou hlavou

První metoda pro měření ozubeného kola a hnací hřídele byla na třísouřadnicovém měřícím stroji WENZEL LH 64 X3M Premium (parametry viz Tabulka 5) s optickou hlavou SHAPETRACER II (parametry viz Tabulka 6) s operačním softwarem PointMaster V5.6.

Tabulka 5 – Parametry třísouřadnicového stroje WENZEL LH 64

WENZEL LH 64 X3M	
Měřicí rozsah:	
x	650 mm
y	1000 mm
z	500 mm
Nosnost granitové desky:	500 kg
Nejistota měření MPEe podle ISO 10360-2 v provedení X3M Premium:	
MPEe	$1,6 \div (L/350)\text{ }\mu\text{m}$
MPEp	$1,6\text{ }\mu\text{m}$

Tabulka 6 – Parametry SHAPETRACER II

SHAPETRACER II	
Pracovní vzdálenost	80 mm
Pracovní plocha	120 mm
Maximální šířka čáry	120 mm
Minimální vzdálenost bodů	29 μm
Maximální bodový rychlost	100 bodů $\cdot\text{ s}^{-1}$
Hmotnost	495 g
Délka	124 mm
Šířka	124 mm
Výška	68 mm
Filtr okolního světla	Ano

Před samotným měřením tištěného vzorku je vždy nejdůležitější úlohou správná a důkladná kalibrace měřícího zařízení. Kalibrace v případě SMS osazený SHAPETRACER II se provádí z časového hlediska každých 5 dní z důvodu změny teploty a vnitřního osvětlení. Samotné pozice jsou v systému uloženy například A0, C0 což značí

svislou polohu snímacího zařízení, které jsou předdefinovány v software. Při spuštění měřicí aplikace systém sám vyhodnotí barevným označením (červená, zelená), jestli jsou vybrané pozice zkalibrované.

V softwaru PointMaster V5.6 byly nastaveny parametry snímání jako jsou souřadnice x, y a z bodu, kde chceme, aby začal sken a souřadnice x, y a z bodu, aby sken skončil viz Obrázek 46. Dále je nutné nastavit parametr stepover, který nám udává překrytí bodů při nové vrstvě snímání a increment což je hustota snímané množiny bodů. ScanLine Filter zůstával běžný s hodnotou 100 %. PH10 s parametry A a C nastavujeme pozici laserového snímače v osách x a y. Vždy se měřená součást centruje do středu osového kříže dle simulace na počítači.

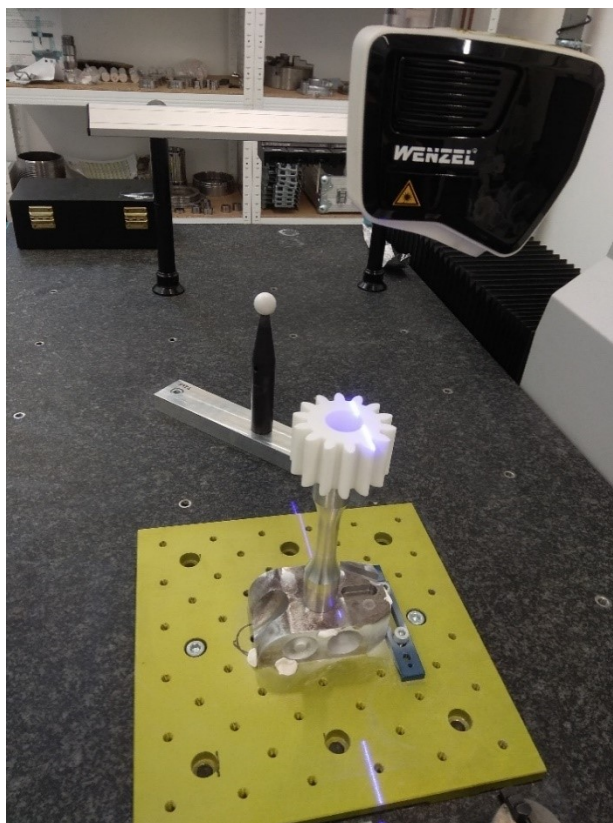


Obrázek 46 – Nastavení parametrů pro snímání

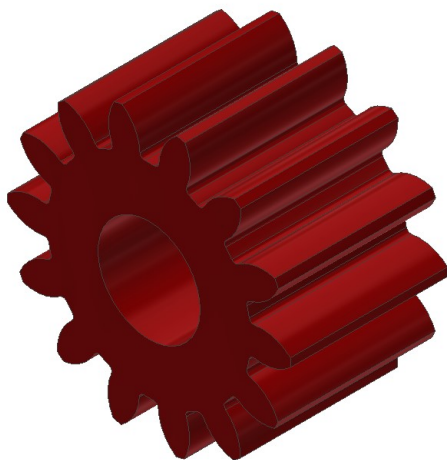
Při samotném procesu skenování dochází k nasnímaní množiny bodů i okolí součástí, která je hlavním předmětem snímání, a to vlivem širokého pásma snímacího laserového paprsku případně kamerových zařízení, k nasnímaní vlivem širokého úhlu snímací kamery.

Veškeré nepotřebná nasnímaná mračna bodů se odstraňují a probíhá takzvaně operace čištění a formování mračna bodu, tedy chystání si součásti pro aplikaci triangulace. Triangulace nám vytvoří z nasnímaného mračna bodů CAD model, dojde k vyplnění ploch v naměřených bodech.

Software dále nabízí možnost vyhlazení extrémních bodů, které jsou mimo aritmetický logaritmus tvaru nasnímaných bodů. Musíme však počítat se skreslením hodnot, pokud zvolíme automatické vyhlazování. Dalším krokem je připasování naměřené součásti k vymodelovanému CAD modelu – určení souřadného systému. V našem případě byla použita funkce Best Fit za pomoci čtyřech zvolených bodů pro připasování nasnímané množiny bodu na nominální CAD model.



Obrázek 47 – Skenování hnacího ozubeného kola



Obrázek 48 – CAD model hnacího ozubeného kola



Obrázek 49 – CAD model hnací hřídele

5.1.1 Nedostatečné naskenování

Na naskenovaném 3D modelu může dojít k nedostatečnému naskenování. To se projevuje chybějícími částmi součásti různé velikosti. To můžeme vyřešit následujícími způsoby:

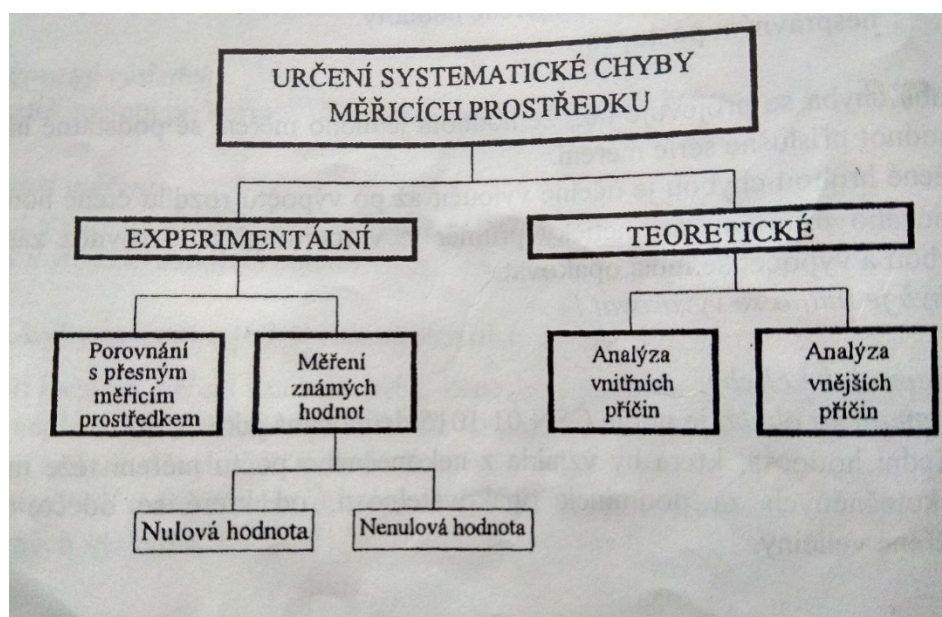
- 1) Dodatečné skenování součásti,
- 2) Automatické dokreslení součásti,
- 3) Ruční dokreslení pomocí trojúhelníků.

Dodatečné skenování součásti je z hlediska přesnosti měření vhodnou volbou, ale je časově nejnáročnější. Automatické dokreslení je nejrychlejší způsob, avšak může vzniknout zkreslení rozměrů a ovlivnit nepříznivě vyhodnocení měření. Tento způsob není vhodný, jestliže se například nenaskenuje celá funkční hrana, která je zapotřebí změřit. Z důvodu že tento způsob automaticky nám dokreslí chybějící část jako jednu chybějící rovinu. Ruční dokreslení pomocí trojúhelníku (třemi body) je přesnější než automatické dokreslení a méně časově náročné než dodatečné skenování.

5.1.2 Chyby a nejistoty měření

Každé měření například délky, úhlu, rádiusu, polohy a tvaru je zatíženo nejistotou měření. Vliv na nejistotu má několik činitelů jako například operátor, který provádí měření, technologie, jakou se měří součást, geometrie prvků, okolní prostředí a jiné. V praxi u měření ovlivňuje výsledek geometrie prvku. Na přesnost měření má vliv i drsnost nebo nečistoty.

U každého měření vznikají chyby, které můžeme rozdělit na chyby, u kterých je důležité se vyhnout (hrubé chyby) a chyby, kterým se vyhnout nelze (systematické chyby a náhodné chyby). Hrubé chyby způsobují hrubou závadu na měřicím přístroji, nesprávné čtení hodnot, nesprávné zapsání naměřených hodnot nebo nesprávný postup měření. Nepřípustnou hrubou chybu poznáme tak, že naměřená hodnota se výrazně liší od ostatních naměřených hodnot. Hodnoty zatížené hrubou chybou se účelně vyřazují až po výpočtu rozdílu zapsané hodnoty od aritmetického průměru. Vzhledem k tomu, že vypočtená hodnota aritmetického průměru je taktéž zasažena hrubou chybou musí se výpočet opakovat. Systematické chyby definuje ČSN 01 1015 jako střední hodnotu, která vzniká z nekonečně zapsaných hodnot z měření té samé měřené veličiny provedeny za podmínek opakovatelnosti, od které se vypočítá rozdílem pravá hodnota měřené veličiny. Systematické chyby se mohou vyskytovat například jako chyby měřicích zařízení, chyby operátora, který provádí měření. Tyto chyby mají za stálých podmínek matematický smysl a chyby způsobené měřicím zařízením, lze určit způsoby viz Obrázek 50. Náhodné chyby není možné odstranit korekcí. Tato chyba se nepravidelně mění u měření. Náhodnou chybu definuje ČSN 01 0115.^{11 34}



Obrázek 50 – Schéma určení systematické chyby pro měřicí prostředky¹¹

Nejistotu měření vyjadřuje parametr hodnot okolo výsledku měření. S nejistotou se můžeme setkat jak u výsledku měření, hodnot použitých konstant tak i u korekcí apod. Standartní nejistota (u) je základní kvantitativní charakteristikou nejistoty. Tato nejistota je vyjádřena směrodatnou odchylkou. Standartní nejistota se dělí podle způsobu vyhodnocení na tři typy typy:¹¹

- 1) Standartní nejistota typu A (u_A),

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

kde:

$s(\bar{x})$... směrodatná odchylka,

x_i ... i -té měření,

\bar{x} ... aritmetický průměr,

n ... počet měření.

- 2) Standartní nejistota typu B (u_B),

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial z_i} \cdot u_{B_{z_i}} \right)^2} \quad (2)$$

kde:

$\frac{\partial f}{\partial z_i}$... parciální derivace funkční závislosti dle zdroje z_i ,

$u_{B_{z_i}}$... standartní nejistota typu B zdroje z_i .

3) Kombinovaná nejistota (u_C).

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3)$$

kde:

u_A ... standartní nejistota typu A,

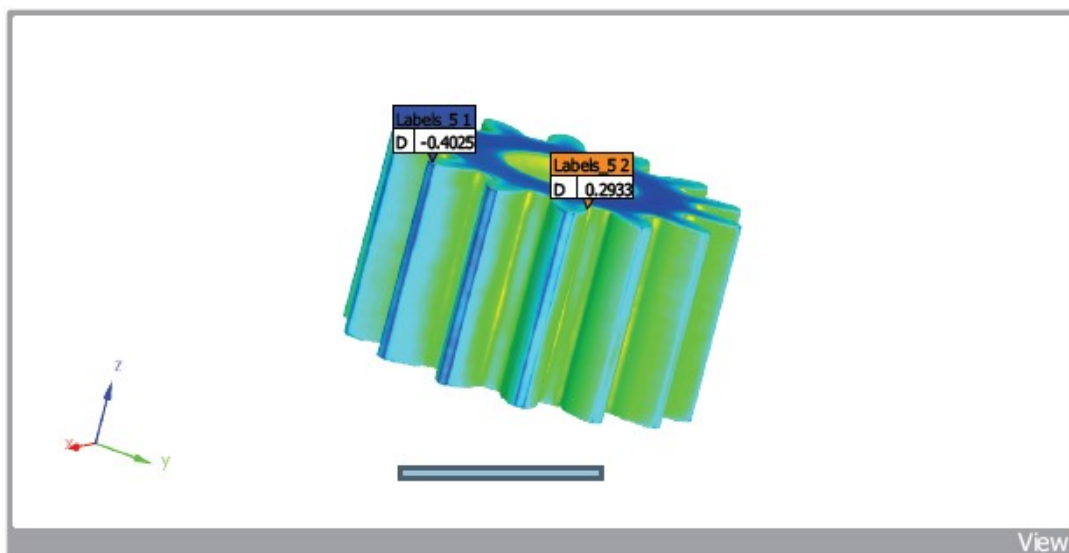
u_B ... standartní nejistota typu B.

Podstatné jsou zejména parametry senzorů multisenzorových souřadnicových měřících přístrojů pro dosažitelnou nejistotu měření. Nejistotu měření lze odhadnout početní simulací u dotykové souřadnicové měřicí techniky. Zmíněná metoda je vysvětlena v normě DIN EN ISO 15530, část 4. Bohužel v dnešní době není tato metoda k dispozici u optických, multisenzorových souřadnicových měřících přístrojů a počítačové tomografie (CT), důvodem je neúplná simulace chyb pro tyto senzory.³⁴

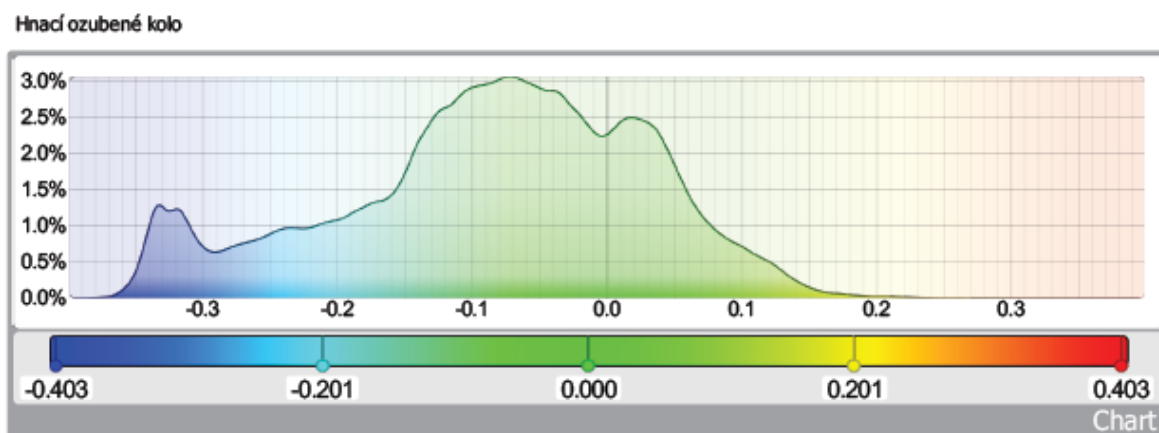
5.1.3 Vyhodnocení

Hnací ozubené kolo

Kontrola hnacího ozubeného kola na geometrické tolerance metodou měření na třísouřadnicovém měřícím stroji WENZEL LH 64 X3M s optickou hlavou SHAPETRACER II probíhala za teploty $20,0^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$. Měřením se zjistilo, že hnací ozubené kolo vyrobeno aditivní technologií SLS má nejvyšší zápornou odchylku - 0,4025 mm a nejvyšší kladnou odchylku 0,2933 mm. Nejvyšší zápornou odchylku software označuje modrou barvou a nejvyšší kladnou odchylku barvou oranžovou (Obrázek 51). Nejnižší odchylka se nachází na hlavě zubu. Tuto odchylku můžeme tolerovat, protože ovlivní chod čerpadla minimálně. Největší odchylka se nachází na patě zubu. I tuto nepřesnost výroby můžeme tolerovat. Software nám vykreslí spektrum barev, každá barva má svou danou hodnotu odchylky (Obrázek 52).

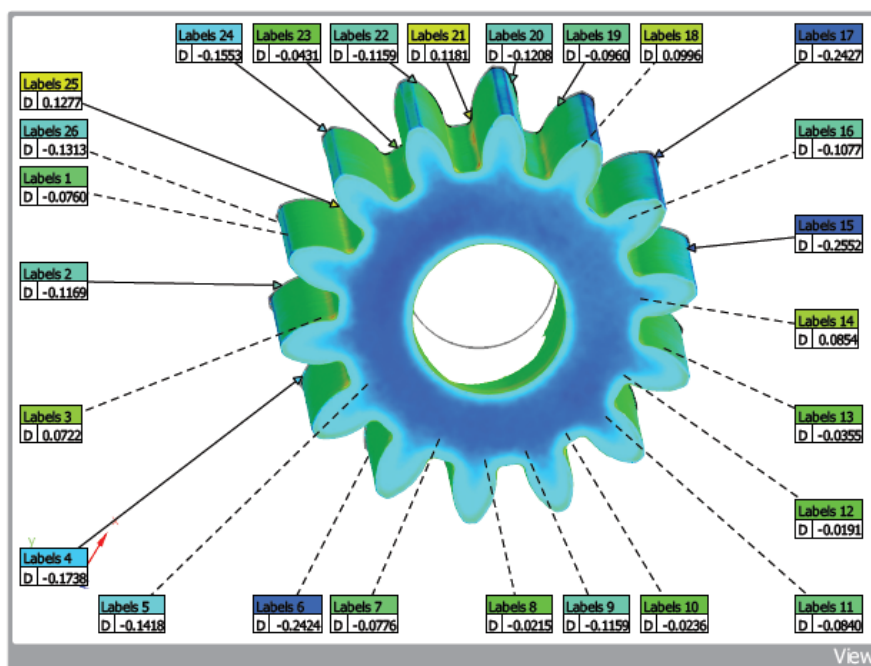


Obrázek 51 – Nejvyšší záporná a nejvyšší kladná odchylka hnacího ozubeného kola (metoda měření SMS)



Obrázek 52 – Barevné spektrum pro odchylka hnacího ozubeného kola

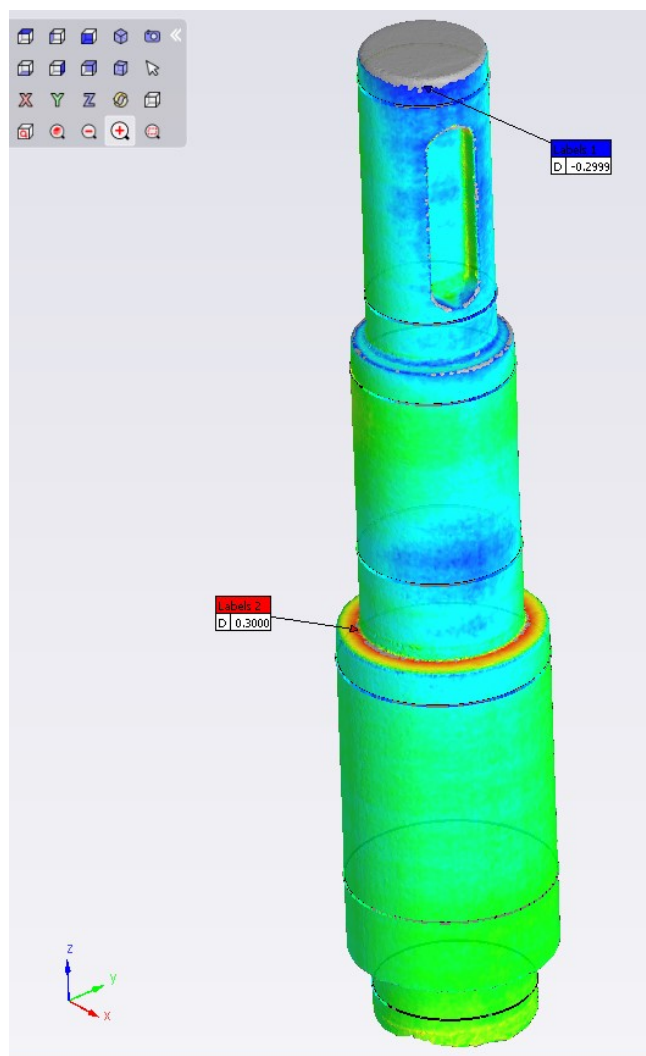
Následně celé hnací ozubené kolo se zbarví dle naměřených odchylek podle barevného spektra. Pro zjištění přesnosti výroby jsme potřebovali další hodnoty na hnacím ozubeném kole, proto jsme změřili hodnoty na více místech (Obrázek 53). Aditivní technologie vyrobila ozubené kolo s desetinnými odchylkami.



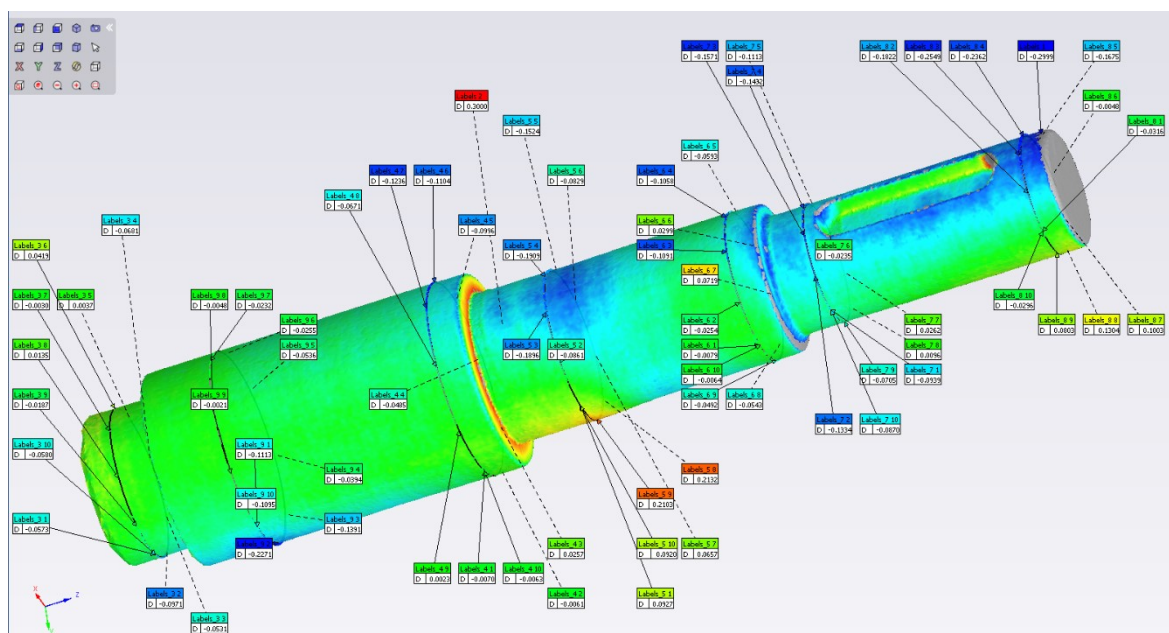
Obrázek 53 – Odchylky ozubeného kola (metoda měření SMS)

Hnací hřídel

Měření hnací hřídele probíhalo obdobně jako měření hnacího ozubeného kole. Měření probíhalo na tříosádnicovém měřícím stroji WENZEL LH 64 X3M s optickou hlavou SHAPETRACER II a probíhalo za teploty $20,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Měřením se zjistilo, že hnací hřídel vyrobena aditivní technologií SLS má největší zápornou odchylku $-0,2999$ mm označeno modrou barvou a nejvyšší kladnou odchylku $0,3000$ mm označenou červenou barvou, která se nachází na čele největšího průměru ($25,9$ mm) Obrázek 54. Opět jsme změřili více hodnot na hnací hřídeli i když celý 3D model byl zbarven dle barevného spektra pro odchylky (Obrázek 55). Aditivní technologie vyrobila hnací hřídel s desetinnými odchylkami, avšak hnací hřídel je vyrobena přesněji než ozubené kolo.



Obrázek 54 – Nejvyšší záporná a nejvyšší kladná odchylka hnací hřídele (metoda měření SMS)



Obrázek 55 – Odchylka hnací hřídele (metoda měření SMS)

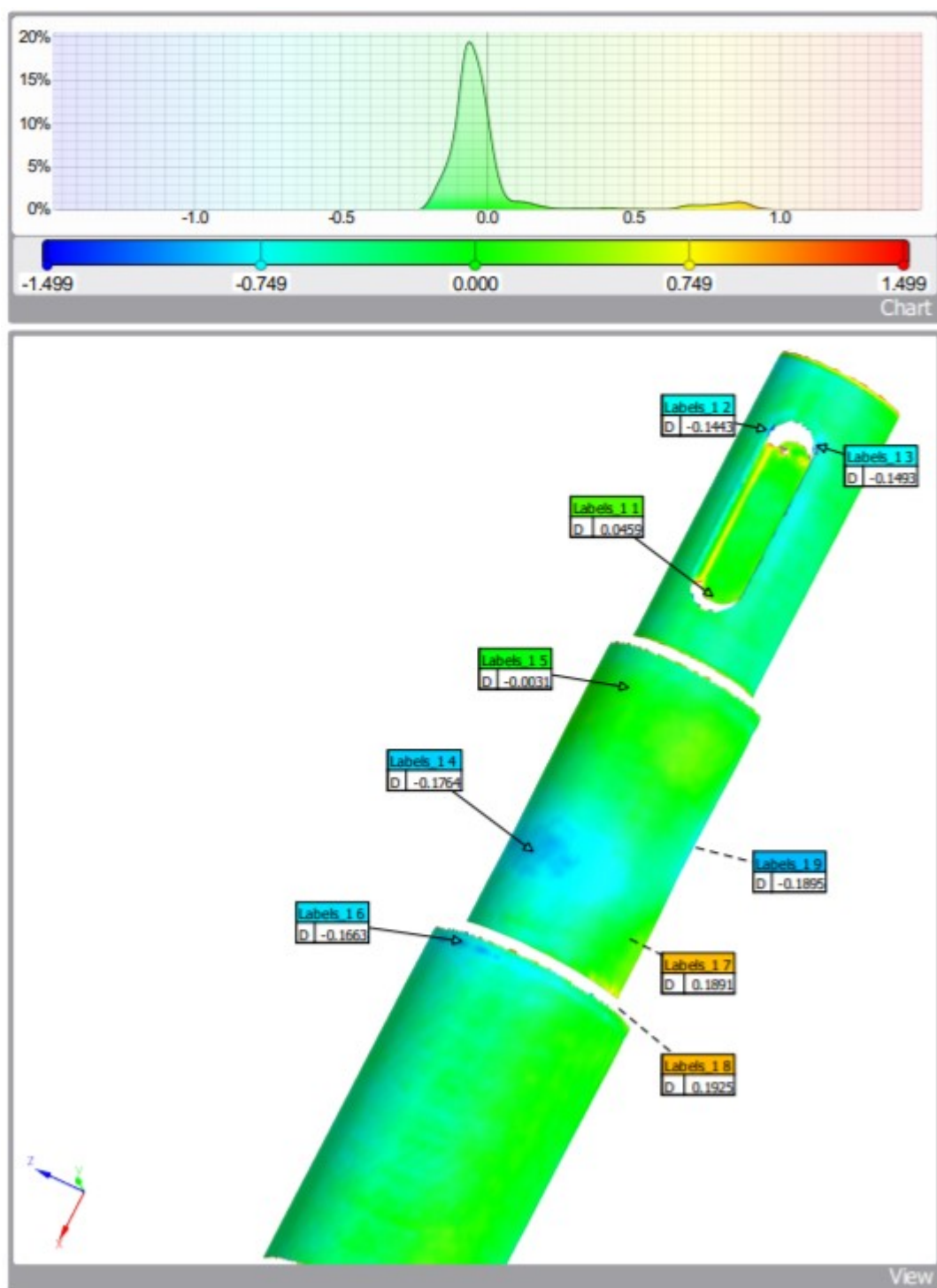
5.2 Měření součástí metodou HandySCAN

Druhá metoda měření ozubeného kola a hnací hřídele se nazývá HandySCAN. Jedná se o zařízení viz Obrázek se snadným ovládáním, s přesností měření od 0,035 mm a okamžitým promítáním polygonové sítě. Metoda se využívá pro skenování těžko přístupných dutin a detailů. Snímat s vysokým rozlišením je možné díky technologii modrého laseru. Zařízení obsahuje indikátor pracovní vzdálenosti, který zajišťuje maximální efektivitu skenování. Jedna z výhod této metody měření spočívá ve snadné manipulaci, protože není potřeba ke skeneru další příslušenství (ramena, portály či trekovací zařízení).³⁵



Obrázek 56 – HandySCAN BLACK³⁵

HandySCAN BLACK s technickými parametry viz Tabulka 7 musí být připojen k napájení a USB kabelem k počítači, kde je nainstalovaný software Control X. Kalibrace u HandySCANu BLACK se provádí před každým měřením za pomoci kalibrační desky z důvodu teplotních odchylek a svítivosti okolí. v reálném čase přibližně 2 minuty. Na vytištěný 3D model ozubeného kola a hnací hřídeli se nalepí poziční značky, které slouží k určení roviny a k algoritmickému dopasování jednotlivých fotech nebo mračen bodů. HandySCAN BLACK dokáže skenovat lesklé plochy, aniž by se musely předem nějak upravovat. Dále HandySCANem BLACK, který má dvě kamery a až 11 laserových křížů pomocí kterých se naskenuje součást a v reálném čase se nám promítne na obrazovce. Pro dosažení větší přesnosti se vybraná místa můžou naskenovat znovu za krátkou dobu. Měření probíhalo ve vyhledávací vzdálenosti 0,3 mm. Po naskenování obou součástí se v daném softwaru porovnají s CAD modelem. Při porovnání naskenovaného modelu s CAD modelem se nám výsledný model zbarví podle zjištěných odchylek (Obrázek č. 57)



Obrázek 57 – Hnací hřídel – porovnání HandySCAN BLACK s CAD modelem

Tabulka 7 – Technické parametry HandySCANu BLACK³⁵

	HandySCAN 307™	HandySCAN BLACK™	HandySCAN BLACK™ ELITE
PŘESNOST (1)	od 0,040 mm	od 0,035 mm	od 0,025 mm
OBJEMOVÁ PŘESNOST (2)	0,020 mm + 0,100 mm/m	0,020 mm + 0,060 mm/m	0,020 mm + 0,040 mm/m
OBJEMOVÁ PŘESNOST při použití MaxSHOT Next™ Elite (3)	0,020 mm + 0,015 mm/m		
MĚŘÍCÍ ROZLIŠENÍ	0,100 mm	0,025 mm	
ROZLIŠENÍ POLYGONOVÉ SÍTĚ	0,200 mm	0,100 mm	
FREKVENCE MĚŘENÍ	480 000 měření/s	800 000 měření/s	1 300 000 měření/s
ZDROJ SVĚTLA	7 červených laserových křížů	7 modrých laserových křížů	11 modrých laserových křížů (+ 1 extra linie pro dutiny)
TŘÍDA LASERU	2M (bezpečný pro oči)		
SKENOVACÍ ROZSAH	275 x 250 mm	310 x 350 mm	
VZDÁLENOST SKENERU OD OBJEKTU	300 mm		
HLOUBKA OSTROSTI	250 mm		
VELIKOST DÍLU (doporučená hodnota)	0,1 – 4 m	0,05 – 4 m	
SOFTWARE	Vxelements		
VÝSTUPNÍ FORMÁTY	.dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr, .3mf		
KOMPATIBILNÍ SOFTWARE	3D Systems (Geomagic® Solutions), InnovMetric Software (PolyWorks), Dassault (CATIA V5 and SOLIDWORKS), PTC (Creo), Siemens (NX and Solid Edge), Autodesk (Inventor, Alias, 3ds Max, Maya, Softimage)		
VÁHA	0.85 kg	0,94 kg	
ROZMĚRY (DxŠxV)	77 x 122 x 294 mm	79 x 142 x 288 mm	
PŘIPOJENÍ DO PC	1 X USB 3.0		
PRACOVNÍ TEPLOTA	5–40°C		
PRACOVNÍ VLHKOST (bez kondenzace)	10–90%		
CERTIFIKACE	EC Compliance (Electromagnetic Compatibility Directive, Low Voltage Directive), compatible with rechargeable batteries (when applicable), IP50, WEEE		
PATENTY	CA 2,600,926, CN 200680014069.3, US 7,912,673, CA 2,656,163, EP (FR, UK, DE) 1,877,726, AU 2006222458, US 8,032,327, JP 4,871,352, US 8,140,295, EP (FR, UK, DE) 2,278,271, EP (FR, UK, DE) 2,230,482, IN 266,573, US 7,487,063, CA 2,529,044, EP (FR, UK, DE) 3,102,908, US 15/114,563, CN 201580007340X		

(1) HandySCAN BLACK a HandySCAN BLACKIElite (ISO 17025 accredited): Založeno na VDI/VDE 2634 part 3 standardu. Odchylka je hodnocena podle měření na kulových artefaktech známých rozměrů. HandySCAN 307: Průměr koule je měřen na kalibrovaném kulovém artefaktu.

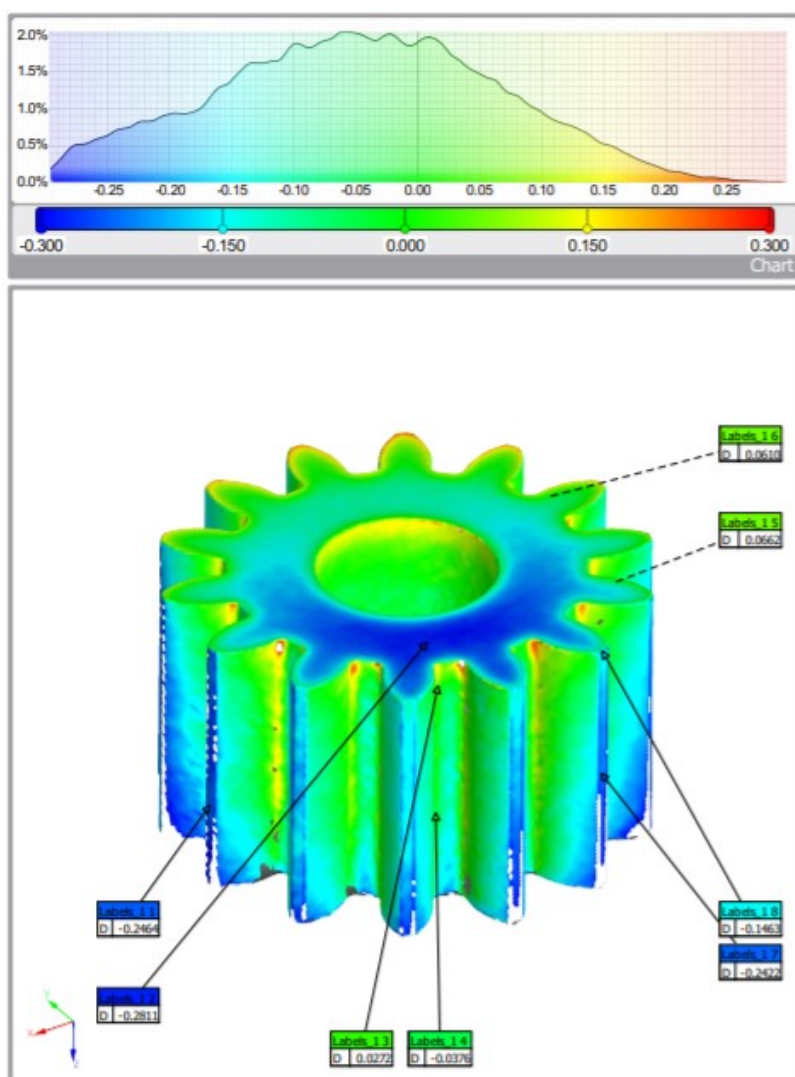
(2) HandySCAN BLACK a HandySCAN BLACKIElite (ISO 17025 accredited): Založeno na VDI/VDE 2634 part 3 standardu. Odchylka na vzdálenosti mezi dvěmi koulemi je vyhodnocena na artefaktu se známým rozměrem. Tento artefakt je měřen v různých pozicích a následně vyhodnocena maximální odchylka ve 2 Sigma. HandySCAN 307: vzdálenost středů dvou koulí je měřena na kalibrovaném artefaktu.

(3) Objemová přesnost systému při použití MaxSHOT 3D nemůže být vyšší než standardní objemová přesnost zvoleného systému a modelu.

5.2.1 Vyhodnocení

Hnací ozubené kolo

Kontrola hnacího ozubeného kola na geometrické tolerance metodou HandySCAN pomocí HandySCAN BLACK probíhala za teploty $20,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Měření prokázalo, že hnací ozubené kolo vyrobeno aditivní technologií SLS má nejvyšší zápornou odchylku - 0,2811 mm a nejvyšší kladnou odchylku 0,1826 mm. Z grafu odchylek hnacího ozubeného kola je zřejmé, že se na hnacím ozubeném kole vyskytují převážně záporné odchylky. Dle grafického znázornění vyplývá, že odchylky se zápornou hodnotou se nacházejí převážně na čele ozubeného kola. Kladné odchylky se nacházejí ve vnitřním průměru hnacího ozubeného kola a většinou u paty zubu. Odchylky s kladnou hodnotou jsou znázorněny červenou barvou a odchylky se zápornou hodnotou se vyznačují modře.

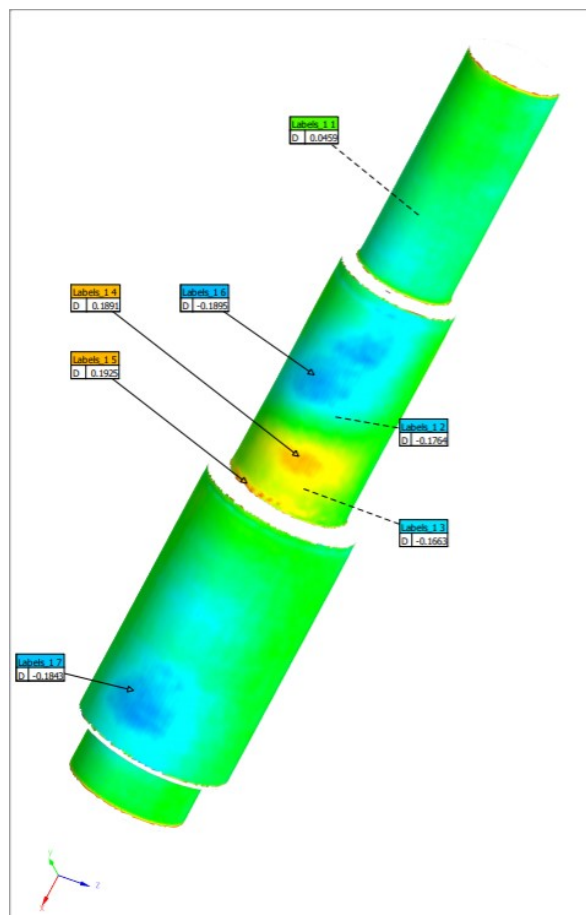


Obrázek 58 – Měření HandySCENem BLACK (hnací ozubené kolo)

Hnací hřídel

Kontrola hnací hřídele na geometrické tolerance metodou HandySCAN pomocí HandySCAN BLACK probíhala za teploty $20,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Měření prokázalo, že hnací

hřídel vyrobena aditivní technologií SLS má nejvyšší zápornou odchylku -0,2811 mm a nejvyšší kladnou odchylku 0,1925 mm. Podle metody měření HandySCAN se na hnací hřídeli nejvíce odchylek nachází na středním průměru hřídele, kde se nachází ložisko. Odchylky s kladnou hodnotou se nachází především na čele největšího průměru a na střední průměru hnací hřídele (Obrázek 59).



Obrázek 59 – Měření HandySCANem BLACK (hnací hřídel)

5.3 Zhodnocení metod měření

U grafického vyhodnocení hnacího ozubeného kolo trísouřadnicovým měřícím strojem WENZEL LH 64 X3M s optickou hlavou SHAPETRACER II vyplývá, že se na součásti nachází převážně odchylka se zápornou hodnotou, což znamená že na některých místech (vyznačeny modrou barvou) chybí materiál v řádech desetin milimetru. Metoda měření s optickou hlavou SHAPETRACER II zjistila, že hnací hřídel disponuje především s odchylkami se zápornou hodnotou. Na grafu této metody jsou zřejmé větší výchylky v zjištěných odchylkách. Dle parametrů trísouřadnicový měřící stroj WENZEL LH 64 X3M s optickou hlavou SHAPETRACER II měří s přesností od 0,020 mm.

Při vyhodnocení hnacího ozubeného kola a hnací hřídele měřeného metodou HandySCAN vyplývá, že se na součásti nachází převážně odchylky se zápornou hodnotou, avšak v grafu se nenachází velké výchylky v naměřených odchylkách jako u metody měření s optickou hlavou. HandySCAN BLACK měří s přesností od 0,035 mm.

Jestliže barevné vykreslení kontrolovaných součástí měřené metodou třísořadnicovým měřícím strojem s optickou hlavou SHAPETRACER II znázorní oblasti, kde se nachází odchylka se zápornou hodnotou tmavě modrou a tyrkysovou barvou, tak měřící metoda HandySCAN převážně tyto oblasti zbarví do zelené barvy, která značí menší odchylky. Z tohoto pohledu měří přesněji metoda měření pomocí optické hlavy SHAPETRACER II, což potvrzují i její parametry. Když se zaměříme na vyhledávání odchylek s kladnou hodnotou, tak HandySCAN BLACK vyhodnocuje více těchto odchylek než měření pomocí optické hlavy SHAPETRACER II u hnacího ozubeného kola. Z hlediska efektivity práce byl HandySCAN BLACK vhodnější pro měření.

6 Závěr

V experimentální části byl cíl porovnat dvě metody bezdotekového měření. Pro experiment se vytvořil CAD model zubového čerpadla v programu Autodesk Inventor Professional 2019, který byl následně převeden do STL souboru v nejvyšší kvalitě a v milimetrech. Zubového čerpadlo bylo vyrobeno aditivní technologií (SLS). Na výrobu součástí se použil materiál EOS PA2200 – (PA12). Pro účely měření byly použity dvě součásti: hnací ozubené kolo a hnací hřídel. Metodou měření třísořadnicovým měřicím strojem WENZEL LH 64 X3M s optickou hlavou SHAPETRACER II a HandySCANem BLACK byly zjišťovány geometrické odchylky na každé ze součástí. Optická hlava SHAPETRACER II měřila bezdotekově za pomoci modrého laseru a kamery. HandySCAN BLACK měřil bezdotekově s dvěma kamerami a modrým laserem.

V závěru bylo očekáváno přesnější měření s optickou hlavou SHAPETRACER II dle jejich parametrů, za pomoci grafického znázornění na daných součástech nebylo očekávání potvrzeno, ba naopak vyvráceno.

Na ozubeném kole i hnací hřídeli se měřením zjistilo, že se na součástech vyskytují převážně odchylky se zápornou hodnotou u obou metod. Tyto odchylky se graficky znázorňují tmavě modrou barvou, která upozorňuje na nejvyšší změřené odchylky se zápornou hodnotou a dále tyrkysovou barvou. Zelené odstíny indikují minimální odchylky, a to jak do minusových hodnot, tak i do kladných hodnot. Minimální odchylka znamená procentuální hodnotu z celého spektra barevné škály tolerančního pole. Dále jsou v menší míře zastoupeny odchylky s kladnou hodnotou, které jsou znázorněny žlutou až červenou barvou. Grafické vyhodnocení proběhlo na základě importování vytvořeného ideálního CAD modelu do modelu získaného měřením jednotlivými metodami.

Měření s optickou hlavou SHAPETRACER II na ozubeném kole ukázalo oblasti se zápornou hodnotou odchylky především na celém čele hnacího ozubeného kola a na hlavách zubů, zatím co HandySCAN BLACK dané oblasti vyhodnotil převážně s menší odchylkou záporné hodnoty především na horní polovině čela ozubeného kola. Výraznější odchylky s kladnou hodnotou byly naměřeny HandySCANem BLACK na patách zubů hnacího ozubeného kola. Nejvyšší odchylka se zápornou hodnotou naměřena třísořadnicovým měřicím strojem s optickou hlavou byla -0,4025 mm a nejvyšší odchylka s kladnou hodnotou byla 0,2933 mm. Nejvyšší HandySCANem naměřená odchylka se zápornou hodnotou byla -0,2811 mm a odchylka s kladnou hodnotou byla 0,1826 mm.

Měření na hnací hřídeli s optickou hlavou SHAPETRACER II vyhodnotilo oblasti se zápornou hodnotou odchylky na rozdíl od HandySCANu BLACK, který dané oblasti částečně vyhodnotil s menší odchylkou záporné hodnoty. Odchylky s kladnou hodnotou přesněji změřila metoda měření pomocí optické hlavy SHAPETRACER II. Nejvyšší odchylka se zápornou hodnotou naměřena třísořadnicovým měřicím strojem s optickou hlavou byla -0,2999 mm a nejvyšší odchylka s kladnou hodnotou byla 0,3000 mm. Nejvyšší HandySCANem naměřená odchylka se zápornou hodnotou byla -0,2811 mm a odchylka s kladnou hodnotou byla 0,1925 mm.

Z hlediska manipulace při kontrolním měření byl vhodnější HandySCAN BLACK, kvůli jeho kompaktnějším rozměrům, hmotnosti a jednoduché obsluhy.

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Ondřejovi Mizerovi za cenné rady, připomínky, odbornou pomoc při zpracování této bakalářské práce.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] OČENÁŠOVÁ, Lenka. *Príspevok k hodnoteniu odchýlky kruhovitosti pri meraní na súradnicovom meracom stroji*: Žilina, 2008, 104 s. Doktorská disertační práce. Žilinská univerzita Fakulta strojní.
- [2] ČSN EN ISO 12181-1 (01 4151). *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Kruhovitost – Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti*. 2005.
- [3] ČSN EN ISO 12181-2 (01 4152). *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Kruhovitost – Část 2: Operátory specifikace*. 2005.
- [4] ČSN ISO 4291 (01 4411). *Metody hodnocení úchylek kruhovitosti – Měření změn poloměru*. 1994.
- [5] ČSN ISO 4292 (01 4412). *Metody hodnocení úchylek kruhovitosti – Měření dvou a tříbodovou metodou*. 1994.
- [6] ČSN EN ISO 10360-1 (252011). *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník*. 2001
- [7] ČSN EN ISO 10360-2:2001 (252011). *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů*. 2001.
- [8] ČSN EN ISO 3274 (25 2322). *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. 1998
- [9] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření: pro SPŠ strojní*. Praha: Informatorium, 2009. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [10] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0672-X.
- [11] PERNIKÁŘ, Jiří, Miroslav TYKAL a Josef VAČKÁŘ. *Jakost a metrologie: část: metrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1997-0.
- [12] KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. *Technické kreslení*. Druhé opravné vydání. Brno: Computer Press, 2012. ISBN 978-80-251-1887-0.
- [13] DRASTÍK, František. *PŘESNOST STROJNÍCH SOUČÁSTÍ PODLE MEZINÁRODNÍCH NOREM: Tolerování rozměrů a geometrických vlastností*. Ostrava: MONTANEX, 1996. ISBN 80-85780-18-6.

- [14] DRASTÍK, František. *Geometrické tolerance v technické dokumentaci pro strojírenství: Tolerování rozměrů a geometrických vlastností*. Praha: Dashöfer, 2016. ISBN 978-80-87963-28-9.
- [15] VOJÁČEK, Antonín. *Principy a málo známé vlastnosti CCD snímačů obrazu* [online]. 2006 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006041001>
- [16] ČIP, Ondřej a Josef LAZAR. *Lasery pro měření a metrologii: Laserové interferometrické měřicí systémy* [online]. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, 2009 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <http://alisi.isibrno.cz/lasery-pro-mereni-a-metrologii>
- [17] *Přístroje pro měření a metrologii: Laser Tracker Vantage* [online]. Uherský Brod: PRIMA BILAVČÍK, 2014 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/tracer/>
- [18] *Úvod do souřadnicového měření* [online]. Praha: Hexagon Manufacturing Intelligence, 2020 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>
- [19] STRIČEK, Daniel. *PRŮMYSLOVÉ CT – ŘEŠENÍ PRO NÁROČNÉ APLIKACE* [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/3424-prumyslove-ct-reseni-pro-narocne-aplikace>
- [20] HERZAN, Petr. Výpočetní tomografie jako silná metoda NDT. *Trendy* [online]. 2017 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vypocetni-tomografie-jako-silna-metoda-ndt.html>
- [21] DOVICE, Miroslav. *METROLÓGIA V STROJÁRSTVE*. Košice: EMILENA spol. s r.o., 2006. ISBN 80-8073-407-0.
- [22] DULA, Jan. *Metrologie ve strojírenství* [online]. Uherské Hradiště: Střední odborná škola technická, 2012 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/mereni-vz-polohy-mustr.pdf>

- [23] FLACK, David. *Measurement Good Practice Guide No. 43: CMM Probing* [online]. Scotland: National Physical Laboratory, 2014 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg43_cmmpp
- [24] DRBÚL, Mário, Michal ŠAJGALÍK, Ján ŠEMCER, Tatiana CZÁNOVÁ, Lenka PETŘKOVSKÁ a Lenka ČEPOVÁ. *STROJÁRSKA METROLÓGIA A KVALITA POVRCHOV VYTVORENÝCH TECHNOLOGIAMI OBRÁBANIA* [online]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2014 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/064/docs/metrologie.pdf>
- [25] *Kapesní průvodce: Vysvětlení snímacích technologií souřadnicových měřicích strojů* [online]. Velké Británii: Renishaw, 2008 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/cs/details/kapesni-pruvodce-vysvetleni-snimacich-technologie-souradnicovych-mericich-stroju--18558>
- [26] *Brožura: Vysoce výkonné pětiosé měření* [online]. Velké Británii: Renishaw, 2018 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/cs/details/vysoce-vykonne-petiose-mereni--39687>
- [27] *White Light vs Blue Light Scanning* [online]. Santa Ana: Capture 3D, 2020 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/white-light-vs-blue-light-scanning>
- [28] *Chromatic white light sensor (CWS)* [online]. Stockholm: HEXAGON, 2020 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/en-US/products/coordinate-measuring-machines/multisensor-and-optical-cmms/sensors-for-optiv/chromatic-white-light-sensor-cws>
- [29] DNA, Johan. *Taking precision blue light 3D scanning to the next level* [online]. Southfield: SME, 2017 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.sme.org/technologies/articles/2017/may/taking-precision-blue-light-3d-scanning-to-the-next-level/>
- [30] *Benefits of ATOS Blue Light Scanner versus a CMM Machine* [online]. Santa Ana: Capture 3D, 2020 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/benefits-of-atos-versus-a-cmm>

- [31] *Blue Light Scanner Improves Scanning of Shiny Surfaces* [online]. Modern Machine Shop, 2015 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/products/blue-light-scanner-improves-scanning-of-shiny-surfaces>
- [32] *SENSOR TYPES: LINE PROFILE SENSORS* [online]. Canada: LMI TECHNOLOGIES, 2020 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://lmi3d.com/products/technologies/projection>
- [33] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice: Přesná, hospodárná a univerzální*. Uherský Brod: PRIMA Bilavčík, 2011.
- [34] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: Dimenzionální měření optikou, dotykovým senzorem a počítačovou tomografií*. Uherský Brod: PRIMA Bilavčík, 2015.
- [35] *HandySCAN 3D BLACK* [online]. Brno: SolidVision [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/skenery/prenosne-3d-skenery/handyscan-3d-black/>